
Untersuchungen über spektrale Kontrastempfindlichkeitsfunktionen des menschlichen Auges im mesopischen Bereich und ihre Einflussparameter

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christoph Schiller
geboren am 14.12.1976
in Höxter

Referent:	Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh
Korreferent:	Prof. Karl R. Gegenfurtner, Ph.D.
Tag der Einreichung:	27.02.2015
Tag der mündlichen Prüfung:	16.06.2015

D17
Darmstadt 2015

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als
URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-49702
URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/4970/>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,
E-Publishing-Service der TU Darmstadt.
<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>
tuprints@ulb.tu-darmstadt.de

Die Veröffentlichung steht unter einer Creative Commons Lizenz:
Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de>

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh für die vorbildliche und intensive Betreuung der Arbeit. Durch seine Begeisterungsfähigkeit für das Thema, viele Diskussionen, Hinweise und Ratschläge hat er entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Karl R. Gegenfurtner für sein Interesse an der Arbeit, der Annahme des Korreferats und der damit verbundenen Investition seiner Zeit. Die Diskussionen mit ihm und Herrn Dr. Alexander C. Schütz waren eine wertvolle Hilfestellung bei der statistischen Analyse der Daten.

Die Basis für die durchgeführten Untersuchungen bilden viele geduldvoll eingebrachte Stunden der teilnehmenden Testpersonen. Für die gute Unterstützung möchte ich mich bei allen Kollegen, Hiwis und Studenten ganz herzlich bedanken.

Mein spezieller Dank gilt Nils Haferkemper, Bastian Zydek und Stefan Brückner für die sehr geschätzte kollegiale Diskussions- und Hilfsbereitschaft und ihren wertvollen Beitrag zum Gelingen der Arbeit.

Meine tief empfundene Dankbarkeit gilt meiner lieben Ehefrau Damaris, meinen Eltern, meiner gesamten Familie und meinen Freunden, die mir in allen Situationen zur Seite gestanden haben.

Münster, den 27. Februar 2015 - *Im internationalen Jahr des Lichts* - Christoph Schiller

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	X
Symbolverzeichnis	XI
Zusammenfassung	1
1 Einleitung.....	2
2 Grundlagen.....	5
2.1 Das visuelle System.....	5
2.1.1 Aufbau des Auges	5
2.1.2 Rezeptorempfindlichkeiten und postrezeptorale Prozesse.....	8
2.1.3 Adaptation und mesopische Wahrnehmung	10
2.1.4 Der Prozess der Wahrnehmung.....	12
2.1.5 Detektion, Kontrast und Schwelle.....	13
2.1.6 Spektrale Hellempfindlichkeitsgrade	14
2.2 Ermittlung der spektralen Empfindlichkeit	18
2.2.1 Methodenübersicht	18
2.2.2 Wahrnehmungsschwellen.....	18
2.2.3 Arten der Reizdarbietung.....	20
2.2.4 Berechnung der spektralen Empfindlichkeit.....	22
2.2.5 Schwankungen in der ermittelten Schwelle	24
2.3 Psychophysik.....	24
2.3.1 Grenz(wert)methode.....	24
2.3.2 Einstell-/Herstellmethode.....	25
2.3.3 Konstanzmethode	25
2.3.4 Psychometrische Funktion.....	25
2.3.5 Adaptive Prozeduren.....	27
2.3.6 Forced-Choice-Methoden	27
3 Bisherige Ergebnisse in der Literatur	29
4 Aufgabenstellung und Ziele der Arbeit	33

5	Versuchsaufbau	36
5.1	Projektor	38
5.1.1	Aufwärmverhalten.....	38
5.1.2	Gammakorrektur.....	39
5.2	Farbfilter	40
5.2.1	Liquid Crystal Tunable Filter (LCTF)	40
5.2.2	Interferenzfilter	41
5.3	Spiegel	42
5.3.1	Voruntersuchungen zum Spiegelmaterial	42
5.3.2	Oberflächenspiegel.....	43
5.4	Projektionsfläche	44
5.5	Detektionsobjekt.....	45
5.6	Hintergrund-Beleuchtung.....	46
5.6.1	Aufbau.....	46
5.6.2	Temperierung.....	47
5.7	Hintergrund-Filter	47
6	Kalibrierung.....	49
6.1	Geometrische Kalibrierung	49
6.2	Kalibrierung des Projektors.....	51
6.3	Kalibrierung der Farbfilter	53
6.4	Kalibrierung der Hintergrund-Beleuchtung.....	55
6.5	Kalibrierung der Hintergrund-Filter	57
6.6	Anbindung an die Literatur	58
7	Parameter, Methodik und Versuchsdurchführung.....	59
7.1	Auswahl der Versuchsparameter.....	59
7.1.1	Adaptationsleuchtdichte L_U	59
7.1.2	Adaptationsspektrum.....	61
7.1.3	Schwerpunkt im sichtbaren Spektralbereich	65
7.1.4	Sehwinkel α und verwendete Objektform	66
7.1.5	Beobachtungswinkel θ	66
7.1.6	Darbietungszeit t_d und Pausenzeit t_p	67
7.1.7	Wiederholungen und Randomisierung.....	69
7.1.8	Adaptation.....	70
7.1.9	Übersicht der ausgewählten Versuchsparameter	70
7.2	Methodik der Versuchsdurchführung.....	71

7.2.1	Adaptive Prozedur	71
7.2.2	Ermittlung der Startwerte	73
7.2.3	Ermittlung der Schwelle	73
7.2.4	Psychometrische Funktion	74
7.2.5	Ja-/Nein-Methodik	74
7.3	Durchführung der Versuche	76
7.3.1	Vorbereitende Tätigkeiten	76
7.3.2	Startphase	77
7.3.3	Adaptation	77
7.3.4	Grobe Ermittlung der Schwelle (Startwerte)	78
7.3.5	Detaillierte Ermittlung der Schwelle	78
7.3.6	Versuchsdauer	78
7.3.7	Versuchsleiter	79
7.4	Testpersonen	79
8	Grundlagen der statistischen Analyse	80
8.1	Statistische Begriffe und Definitionen	80
8.1.1	Abhängige vs. unabhängige Stichproben	80
8.1.2	Abhängige vs. unabhängige Variablen	81
8.1.3	Parametrische vs. nichtparametrische statistische Tests	81
8.2	Statistische Tests und Methoden	81
8.2.1	Auswahl eines geeigneten Testverfahrens	82
8.2.2	Voraussetzungen bei der Anwendung parametrischer Tests	84
8.2.3	Prüfung auf Ausreißer (Voraussetzung 3)	85
8.2.4	Prüfung auf Normalverteilung (Voraussetzung 4)	87
8.2.5	Prüfung auf Sphärizität (Voraussetzung 5)	90
8.2.6	Bonferroni-Korrektur	90
8.2.7	Rangplatzsummen nach dem Kruskal-Wallis-Test	91
8.2.8	95 %-Konfidenzintervall	91
9	Ergebnisse der statistischen Analyse	92
9.1	Prüfung auf Ausreißer (Voraussetzung 3)	92
9.2	Prüfung auf Normalverteilung (Voraussetzung 4)	92
9.2.1	Intraindividuelle Prüfung auf Normalverteilung	92
9.2.2	Interindividuelle Prüfung auf Normalverteilung	92
9.3	Prüfung auf Sphärizität (Voraussetzung 5)	93
9.4	Zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung	94
9.4.1	Analyse der Haupteffekte	95
9.4.2	Einfache Haupteffekte (Post-hoc-Tests)	95

9.5	Interindividuelle Unterschiede.....	97
9.5.1	Rangplatzsummen nach Kruskal-Wallis.....	97
9.5.2	95 %-Konfidenzintervall.....	98
10	Diskussion der Ergebnisse.....	99
10.1	Interindividuelle Unterschiede.....	99
10.2	Einfluss des Adaptationsspektrums $L_{eU}(\lambda)$	101
10.2.1	Ergebnisse der ANOVA	102
10.2.2	Detaillierte Analyse für $\Theta = 10^\circ$; $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$	102
10.3	Einfluss des Objektspektrums $L_{eO}(\lambda)$	105
10.4	Einfluss der Adaptationsleuchtdichte L_U	105
10.5	Einfluss des Beobachtungswinkels Θ	109
10.6	Vergleich mit ausgewählten anderen Untersuchungen.....	110
10.6.1	Vergleich mit HAMM 1997 [73]	111
10.6.2	Vergleich mit VARADY et al. 2007 [168]	111
10.6.3	Vergleich mit FREIDING 2010 [54]	112
10.6.4	Vergleich mit KURTENBACH et al. 1999 [105]	113
10.7	Vergleich mit dem Modell nach CIE 191:2010 [33]	114
11	Zusammenfassung und Ausblick.....	118
12	Literatur	121
	Anhang.....	135
	Veröffentlichungen und betreute Arbeiten	152
	Erklärung laut §9 der Promotionsordnung	160

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Lichtfunktionen und adaptive Frontbeleuchtungssysteme	3
Abbildung 2.1: Aufbau des menschlichen Auges (Horizontalschnitt links).....	5
Abbildung 2.2: Aufbau der Netzhaut und Schema der Reaktion einzelner Neurone.....	6
Abbildung 2.3: Dichte der Rezeptoren (links) und die Sehschärfe (rechts).....	7
Abbildung 2.4: Schematisches Modell des Farbensehens.....	9
Abbildung 2.5: Spektrale Empfindlichkeiten der Zapfen und Opponentmechanismen	10
Abbildung 2.6: Dunkeladaptation der Zapfen und Stäbchen.....	11
Abbildung 2.7: Verarbeitung und Prozesse im visuellen System.....	12
Abbildung 2.8: Spektrale Hellempfindlichkeitsgrade $V(\lambda)$, $V_M(\lambda)$, $V'(\lambda)$	16
Abbildung 2.9: Arten der Reizdarbietung nach GERDES 1979 [59].....	21
Abbildung 2.10: Absolute spektrale Strahldichteverteilungen: Hintergrund, Objekt, Inkrement.....	22
Abbildung 2.11: Visuelles Kontrastexperiment und resultierende psychometrische Funktion.....	26
Abbildung 4.1: Struktur der Arbeit, Übersicht der einzelnen Kapitel und deren Inhalte	35
Abbildung 5.1: Gesamtaufbau der Versuchsanordnung (Draufsicht, nicht maßstabsgetreu).....	36
Abbildung 5.2: Aufwärmverhalten des Projektors nach dem Kaltstart	39
Abbildung 5.3: Transmissionsverhalten des LCTF in Abhängigkeit von der Wellenlänge	41
Abbildung 5.4: Versatz des Objektes durch mehrfache Brechung (Haushaltsspiegel).....	42
Abbildung 5.5: Verzerrte Abbildung durch das Spiegelmaterial MIRO 27	43
Abbildung 5.6: Eigenschaften des verwendeten Oberflächenspiegels	44
Abbildung 5.7: Projektionsfläche für das Detektionsobjekt.....	44
Abbildung 5.8: Hintergrund-Beleuchtung.....	46
Abbildung 5.9: Temperierung der Hintergrund-Beleuchtung	47
Abbildung 5.10: Spektraler Transmissionsgrad der untersuchten Lee ND-Filterfolien	48
Abbildung 6.1: Arbeitsschritte und benötigte Dauer zum Kalibrieren des Versuchsaufbaus	49
Abbildung 6.2: Detektionsobjekt (Foto) zur Überprüfung der Kalibrierung ($\alpha = 3^\circ$, $\theta = 0^\circ$)	50
Abbildung 6.3: Blick auf den Versuchsaufbau bei geöffneter Seitentür.....	52
Abbildung 6.4: Kennlinien des Projektors für die Kanäle Rot, Grün, Blau und Weiß.....	52
Abbildung 6.5: Absolute spektrale Strahldichte $L_e(\lambda)$ der einzelnen Kanäle des Projektors	53

Abbildung 6.6: Spektrale Charakteristik der verwendeten Interferenzfilter	54
Abbildung 6.7: Spektralen Strahldichte $L_e(\lambda)$ der 23 LED-Kanäle	56
Abbildung 6.8: Ermittelte Kennlinien für sechs ausgewählte LED-Kanäle	56
Abbildung 6.9: Spektraler Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ der selbst gedruckten Filterfolien	57
Abbildung 6.10: Überprüfung der Kalibrierung und Anbindung an die Literatur	58
Abbildung 7.1: Verlauf der Leuchtdichte vor dem Fahrzeug	59
Abbildung 7.2: Durchschnittsgeschwindigkeit im Straßenverkehr	60
Abbildung 7.3: Ausstattungsgrad der Fahrzeuge mit „Xenon“-Scheinwerfern (Deutschland)	62
Abbildung 7.4: Spektren der LED-Hintergrund-Beleuchtung am Beispiel $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$	64
Abbildung 7.5: Schematische Darstellung zur Festlegung des Beobachtungswinkels θ	66
Abbildung 7.6: Zeitlicher Verlauf von Darbietungs- und Pausenzeit	69
Abbildung 7.7: Einfluss der Anzahl der Wiederholungen je Parameterkombination	69
Abbildung 7.8: Schematische Darstellung der Projektionsfläche mit Fixation und Objekt	71
Abbildung 7.9: Schematische Darstellung der doppelten Staircase	72
Abbildung 7.10: Einzelschritte eines vollständigen Tests	76
Abbildung 7.11: Ablaufdiagramm des Tests zur Schwellenermittlung (vereinfacht)	77
Abbildung 8.1: Beispiel für eine nicht signifikante Interaktion bei zwei Adaptationsspektren	82
Abbildung 8.2: Entscheidungsbaum je nach Auftreten einer signifikanten Interaktion	83
Abbildung 8.3: Schematische Darstellung eines Boxplots mit Kennwerten	86
Abbildung 8.4: Grafische Überprüfung auf Normalverteilung (10x Schwelle bei Filter 530 nm)	88
Abbildung 9.1: Q-Q-Plot für $\theta = 2,65^\circ$, HAL, $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ bei $\lambda_s = 652 \text{ nm}$	93
Abbildung 9.2: Über alle Testpersonen gemittelte spektrale Empfindlichkeiten	94
Abbildung 9.3: Gemittelte spektrale Empfindlichkeiten mit 95 %-KI für HAL	98
Abbildung 10.1: Unterschiedsfaktoren UF anhand der Rangplatzsummen	99
Abbildung 10.2: Absolute spektrale Empfindlichkeiten mit 95 %-KI für das HAL-Spektrum	100
Abbildung 10.3: Schwelleninkrement auf homogenem Hintergrund	101
Abbildung 10.4: Mittlere spektrale Empfindlichkeiten für $\theta = 10^\circ$; $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$	102
Abbildung 10.5: Absolute spektrale Strahldichte für $\theta = 10^\circ$; $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$	103
Abbildung 10.6: Mittlere absolute spektrale Empfindlichkeit für $\theta = 2,65^\circ$	107
Abbildung 10.7: Verhältnis der absoluten spektralen Empfindlichkeiten für $\theta = 2,65^\circ$	107

Abbildung 10.8: Mittlere spektrale Empfindlichkeiten und Rezeptorempfindlichkeiten	108
Abbildung 10.9: Verhältnis $U(\theta)$ der relativen spektralen Empfindlichkeiten für $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$...	110
Abbildung 10.10: Relative spektrale Empfindlichkeiten für $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ und $\theta = 2,65^\circ$	111
Abbildung 10.11: Relative spektrale Empfindlichkeiten für $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ und $\theta = 10^\circ$	112
Abbildung 10.12: Relative spektrale Empfindlichkeiten für $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ und $\theta = 2,65^\circ$	113

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Übersicht ausgewählter Schwellenuntersuchungen im mesopischen Bereich.....	31
Tabelle 6.1: Gammafaktoren der einzelnen Kanäle des Projektors.....	52
Tabelle 6.2: Übersicht der verwendeten Farbfilter und deren spektrale Eigenschaften.....	55
Tabelle 7.1: Ziel-Spektren für die Laboruntersuchungen (Vorgaben für den Optimierer).....	63
Tabelle 7.2: Verwendete Ziel-Spektren in Abhängigkeit des Beobachtungswinkels θ	64
Tabelle 7.3: Farbmetrische Daten der verwendeten Adaptationsspektren (Messwerte).....	65
Tabelle 7.4: Festgelegte Beobachtungswinkel θ	67
Tabelle 7.5: Ausgewählte Parameter für die durchgeführten Laboruntersuchungen	70
Tabelle 7.6: Übersicht der Parameter des verwendeten Staircase-Verfahrens.....	75
Tabelle 7.7: Übersicht der Testpersonen.....	79
Tabelle 8.1: Vergleich von verbundenen und unverbundenen Stichproben.....	80
Tabelle 8.2: Berechnung der Rangplatzsummen	91
Tabelle 9.1: Übersicht der Testergebnisse auf Sphärizität.....	93
Tabelle 9.2: Übersicht der Testergebnisse der ANOVA.....	95
Tabelle 9.3: Übersicht der Testergebnisse der Haupteffekte der ANOVA.....	95
Tabelle 9.4: Wellenlängen mit signifikanten Unterschieden zwischen den Adaptationsspektren.....	96
Tabelle 9.5: Empfindlichkeit der einzelnen Probanden anhand der Rangplatzsummen.....	97
Tabelle 10.1: Mittlere absolute spektrale Empfindlichkeiten in $(\text{m}^2 \cdot \text{sr})/\text{W}$	103
Tabelle 10.2: Absol. spektrale Strahldichten in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ und deren Unterschiedsfaktoren (UF)	104
Tabelle 10.3: S/P-Verhältnisse für die Spektren HAL, ISO und LED.....	115
Tabelle 10.4: Mesopische Leuchtdichte L_{mes} nach CIE 191:2010 [33]	115
Tabelle 10.5: Quotienten der mesopischen Leuchtdichte L_{mes}	115
Tabelle 10.6: Mesopische Schwellenleuchtdichte $L_{\text{mes,S}}$ im Vergleich mit den CIE-Werten.....	116

Abkürzungsverzeichnis

2

2AFC	two- a lternative f orced- c hoice
2IFC	two-interval-forced-choice

A

ANOVA	A Nalysis O f V ariance
ANSI	A merican N ational S tandards I nstitute

C

CCT	C orrelated C olour T emperature; ähnlichste Farbtemperatur
CIE	C ommission I nternational de l'Éclairage (Int. Beleuchtungskommission)
CV	C odewert (C ode V alue)

D

DLP	D igital L ight P rocessing
DMD	D igital M icromirror D evice

H

HDMI	H igh D efinition M ultimedia I nterface
------	--

I

IQR	I nterquartilsabstand
-----	------------------------------

K

KI	K onfidenzintervall
K-S-Test	K olmogorov- S mirnov-Anpassungstest

L

LCTF	L iquid C rystal T unable F ilter
LED	L icht E mittierende D iode

P

PF	P sychemetrische F unktion
P-P-Plot	P robability- P robability-Diagramm (Plot)
PVD	P hysical V apour D eposition
P-VIP	P rofessional V ideo P rojection (geschützter Lampenname der Osram AG)
PWM	P ulsweiten m odulation

Q

Q-Q-Plot	Q uartil- Q uartil-Diagramm (Plot)
----------	--

S

SPSS	I BM S PSS S tatistics 22 (Statistiksoftware)
------	--

U

UF	U nterschiedsfaktor
----	----------------------------

Symbolverzeichnis

A	Ausgangsgröße
α	Sehwinkel (Objektgröße); Irrtumswahrscheinlichkeit bei Hypothesentests
α_r	Reizintensität an der Schwelle (Wendepunkt) bei der psychometrischen Funktion
β	Steigung der psychometrischen Funktion
d	Abstand Auge - Projektionsfläche
E	Eingangsgröße
γ	Ratewahrscheinlichkeit bei der psychometrischen Funktion
K_W	Kontrast nach Weber
K_{Sa}	achromatischer Schwellenkontrast
$\Delta\lambda$	Schrittweite zum nächsten Filter
λ	Wellenlänge
λ_{HWB}	Halbwertsbreite
λ_S	Schwerpunktwellenlänge
ΔL_S	Schwellenleuchtdichtedifferenz; Achromatische (Unterschieds-)Schwelle
$\Delta L_{eS, \lambda_i}(\lambda)$	absolute spektrale Strahldichte an der achromatischen Unterschiedsschwelle
$L_{eU}(\lambda)$	absolute spektrale Strahldichte des Umfeldes (Hintergrund)
$L_{eO}(\lambda)$	absolute spektrale Strahldichte des Objektes
$L_e(\lambda)$	absolute spektrale Strahldichte
L_e	Strahldichte
L_O	Objekt-/Testzeichenleuchtdichte bzw. achromatische Wahrnehmungsschwelle
L_U	Umfeld-/Adaptationsleuchtdichte
$P(x)$	Wahrscheinlichkeit für korrekte Antwort bei psychometrischer Funktion
r	Radius des Detektionsobjektes
$\rho(\lambda)$	spektraler Reflexionsgrad
s_a	Anhalteweg
s_b	Bremsweg
s_r	Reaktionsweg

s	Standardabweichung der Stichprobe
s_{θ}	seitlicher Abstand Fahrer zu Fußgänger
SE	Standardfehler
θ	Beobachtungswinkel (Lage des Objektes im Gesichtsfeld)
t_a	Adaptationszeit
t_d	Darbietungszeit
t_p	Pausenzeit
$\tau(\lambda)$	spektraler Transmissionsgrad
UE_a	achromatische Unterschiedsempfindlichkeit
$U(x; y)$	Farbort
v	Geschwindigkeit
$v(\lambda_i)$	absolute spektrale Empfindlichkeit
$v_{\text{rel}}(\lambda_i)$	allgemeiner relativer Empfindlichkeitsgrad
$v(\lambda)_{\text{max}}$	maximale spektrale Empfindlichkeit
$V(\lambda)$	spektraler Hellempfindlichkeitsgrad für das Tagessehen (CIE 18.2 [27])
$V'(\lambda)$	spektraler Hellempfindlichkeitsgrad für das Nachtsehen (CIE 1951 [25])
$V_M(\lambda)$	spektraler Hellempfindlichkeitsgrad für das Tagessehen (CIE 86 [29])
x_i	Stichprobenwert
\bar{x}	Mittelwert der Stichprobe
z_i	z-transformierter Wert einer Stichprobe

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss der *spektralen* Strahldichteverteilung von Kfz-Lichtquellen im Gesichtsfeld eines Kraftfahrers (Adaptationsspektrum) auf die Detektion von Objekten auf Basis des Kontrastes an der Wahrnehmungsschwelle untersucht.

Anhand der Unfallstatistik wird gezeigt, wie wichtig die Detektionsleistung eines Kraftfahrers für die Vermeidung von nächtlichen Unfällen ist. In der Kfz-Lichttechnik stehen drei Lichtquellen mit völlig unterschiedlichen spektralen Lichtverteilungen zur Verfügung (Halogenglühlampe, Entladungslampe, LED). Durch die Entwicklung von Scheinwerfern auf Basis von LED-Arrays ergibt sich die zentrale Fragestellung, ob eine Änderung der *spektralen* Zusammensetzung des Lichts in Abhängigkeit vom Winkel Vorteile für die Detektion bringt.

Die Literaturrecherche zeigt, dass es für den mesopischen Bereich nur wenige verwendbare und zudem kaum vergleichbare Untersuchungen gibt. Aus diesem Grund wurde nach einer methodischen Analyse als ein zentraler Aspekt der Arbeit ein geeigneter Versuchsstand entwickelt. Dabei wurde die Parameterwahl gezielt auf typische Bedingungen des nächtlichen Straßenverkehrs ausgelegt. Der Versuchsstand wurde kalibriert und durch Vortests auf den Normalbeobachter der CIE zurückgeführt. Anhand einer Probandenstudie wurde im zweiten Teil der Arbeit der Einfluss von vier unterschiedlichen spektralen Strahldichteverteilungen des Adaptationsfeldes (HAL, ISO, D65, LED) auf die Detektion von Objekten untersucht. Wichtige Parameter wie die Adaptationsleuchtdichte L_U und der Beobachtungswinkel θ wurden dabei kontrolliert variiert. Die Rohdaten wurden statistisch aufbereitet und einer Signifikanzanalyse unterzogen.

Die Ergebnisse zeigen eine deutlich erkennbare interindividuelle Streuung. Die Annahme eines „Normalbeobachters“ kann nicht gestützt werden. Die statistische Analyse zeigt, dass eine Variation des Adaptationsspektrums keinen signifikanten Einfluss auf die Detektion von Objekten dicht an der Sehachse ($\theta = 2,65^\circ$; $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ und $0,1 \text{ cd/m}^2$) hat. Jedoch konnte für einen zunehmenden Beobachtungswinkel und eine geringere Adaptationsleuchtdichte ($\theta = 10^\circ$; $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$) ein signifikanter Einfluss des Adaptationsspektrums auf die Detektion im Bereich der Empfindlichkeit der Stäbchenrezeptoren festgestellt werden. Durch Variation des Beobachtungswinkels und der Adaptationsleuchtdichte wurde die Beteiligung des chromatischen und achromatischen Systems im mesopischen Bereich nachgewiesen und mit anderen Untersuchungen verglichen. Die spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ ist hier nachweislich nicht zur Anwendung geeignet. In Übereinstimmung mit der Literatur konnte ein signifikanter Einfluss des Objektspektrums, der Adaptationsleuchtdichte und des Beobachtungswinkels auf die Detektion nachgewiesen werden.

Durch einen Vergleich der ermittelten Daten mit dem mesopischen Wahrnehmungsmodell der CIE konnte eine grundlegende Übereinstimmung festgestellt werden. Das vorhergesagte Niveau für $\theta = 10^\circ$ und $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ ist jedoch zu hoch. Im Vergleich zwischen dem zur Adaptation verwendeten Spektrum ähnlich dem einer Glühlampe (HAL) und dem einer LED ist festzuhalten: das verwendete LED-Spektrum erzeugt im Vergleich zu HAL für $\theta = 10^\circ$ eine um 7 % ($L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$) bzw. 19 % ($L_U = 1 \text{ cd/m}^2$) höhere mesopische Leuchtdichte.

Eine spektrale Anpassung der Lichtverteilung ist auf Basis der vorliegenden Daten nur für größere Beobachtungswinkel und niedrige Adaptationsleuchtdichten ($\theta = 10^\circ$; $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$) sinnvoll.

1 Einleitung

Beim Führen eines Kraftfahrzeuges erhält der Fahrer den größten Teil der benötigten Informationen über das visuelle System. Eine Studie zeigt für 2036 untersuchte Unfälle, dass in 95 % der Fälle Fahrerfehler die Ursache sind. 44 % davon sind auf Wahrnehmungsfehler zurückzuführen (vgl. PLAINIS et al. 2012 [135]). Bei Dunkelheit ist die visuelle Wahrnehmung vor besonders große Herausforderungen gestellt. Da mit abnehmender Helligkeit das Farbensehen nachlässt, wird die Kontrastwahrnehmung zur bestimmenden sicherheitskritischen Größe bei der Detektion von Fußgängern und Objekten im Verkehrsraum. Wie entscheidend eine gute Ausleuchtung zur Detektion von Fußgängern ist, zeigt eine Studie des Instituts für Fahrzeugsicherheit in München. Ein Drittel der untersuchten Unfälle mit verletzten Fußgängern fand dabei in der Dunkelheit und Dämmerung statt. Zudem ereigneten sich etwa 60 % aller Unfälle mit getöteten Fußgängern in der Dunkelheit (zitiert aus WINNER et al. 2014 [182]).

In einer Untersuchung zu Gefahren für Autofahrer bei Dunkelheit (vgl. DVR 2008 [46]) geben 53 % der Befragten an, dass sie sich davor fürchten, Radfahrer oder Fußgänger zu übersehen bzw. Hindernisse zu spät zu sehen (43 %). Südkoreanische Wissenschaftler haben die hohe Unfallrate in ihrem Land mit dem Bestand der zugelassenen Fahrzeuge verglichen. Sie stellten eine hohe Korrelation zwischen der geringen Sichtbarkeitsweite der Autoscheinwerfer und der Unfallrate fest (vgl. WINNER et al. 2014 [182]).

Die Kraftfahrzeuglichttechnik ist seit den Anfängen des Automobils bestrebt, die Sehbedingungen bei Nacht für den Fahrer so gut wie möglich zu gestalten. Dabei gilt es immer einen Kompromiss aus guter Sicht und Blendungsvermeidung zu finden. Die Detektionsdistanzen können je nach Lichtsystem sehr unterschiedlich ausfallen (vgl. SCHILLER et al. 2009 [147]).

In den letzten 10 Jahren zeichnen sich zwei deutliche Entwicklungstendenzen in der Kraftfahrzeuglichttechnik ab. Einerseits stehen seit der Nutzung der Licht emittierenden Diode (LED) zusammen mit den etablierten Halogenglühlampen und Entladungslampen drei Lichtquellen mit völlig unterschiedlichen spektralen Verteilungen zur Verfügung. Dabei bietet die LED eine besonders hohe Flexibilität bei der Auslegung des Emissionsspektrums durch die Auswahl geeigneter LED-Chips und Leuchtstoffe. Andererseits weist die technische Entwicklung moderner Frontbeleuchtungssysteme eine sehr dynamische Entwicklung auf.

Die klassischen Lichtfunktionen des Abblendlichtes und Fernlichtes werden mehr und mehr durch assistenzbasierte Scheinwerfersysteme mit Kameraunterstützung ersetzt (vgl. Abbildung 1.1). Nach der Einführung einer dynamischen Veränderung der horizontalen Hell-Dunkel-Grenze (HDG) zur Sichtverbesserung, bieten heute auch Technologien wie das Markierungslicht (vgl. SCHNEIDER 2011 [151]) und das blendfreie Fernlicht auf Basis von Entladungslampen (vgl. ZYDEK et al. 2013 [186], Abbildung 1.1) oder auf Basis von LEDs (vgl. TOTZAUER 2013 [166]) ein großes Potenzial zur Sichtverbesserung.

Aktuelle Entwicklungstendenzen zeichnen sich durch eine Verbesserung der Detektionsdistanz durch die Nutzung von laserbasierten Fernlichtsystemen als Zusatz zum regulären Fernlicht ab (vgl. BMW 2015 [11], AUDI [6]). Einen grundlegenden Wandel in der Gestaltung der räumlichen Lichtverteilung stellen Scheinwerfersysteme auf Basis von LED-Arrays dar. Diese ermöglichen es je nach ver-

fügbare Anzahl an einzelnen „LED-Pixeln“, die Lichtverteilung in Abhängigkeit von der Verkehrssituation orts aufgelöst flexibel zu gestalten. Aktuell werden Systeme mit 256 LEDs entwickelt (vgl. OSRAM 2014 [129]). Die Bestrebungen gehen aber bereits dahin über, Systeme mit mehr als 1000 Pixeln zu entwickeln.

Fasst man beide Entwicklungstendenzen in der automobilen Lichttechnik zusammen, so wären technisch gesehen in Zukunft Scheinwerfersysteme möglich, die orts aufgelöst je nach Winkel eine unterschiedliche spektrale Zusammensetzung des Lichts ermöglichen.

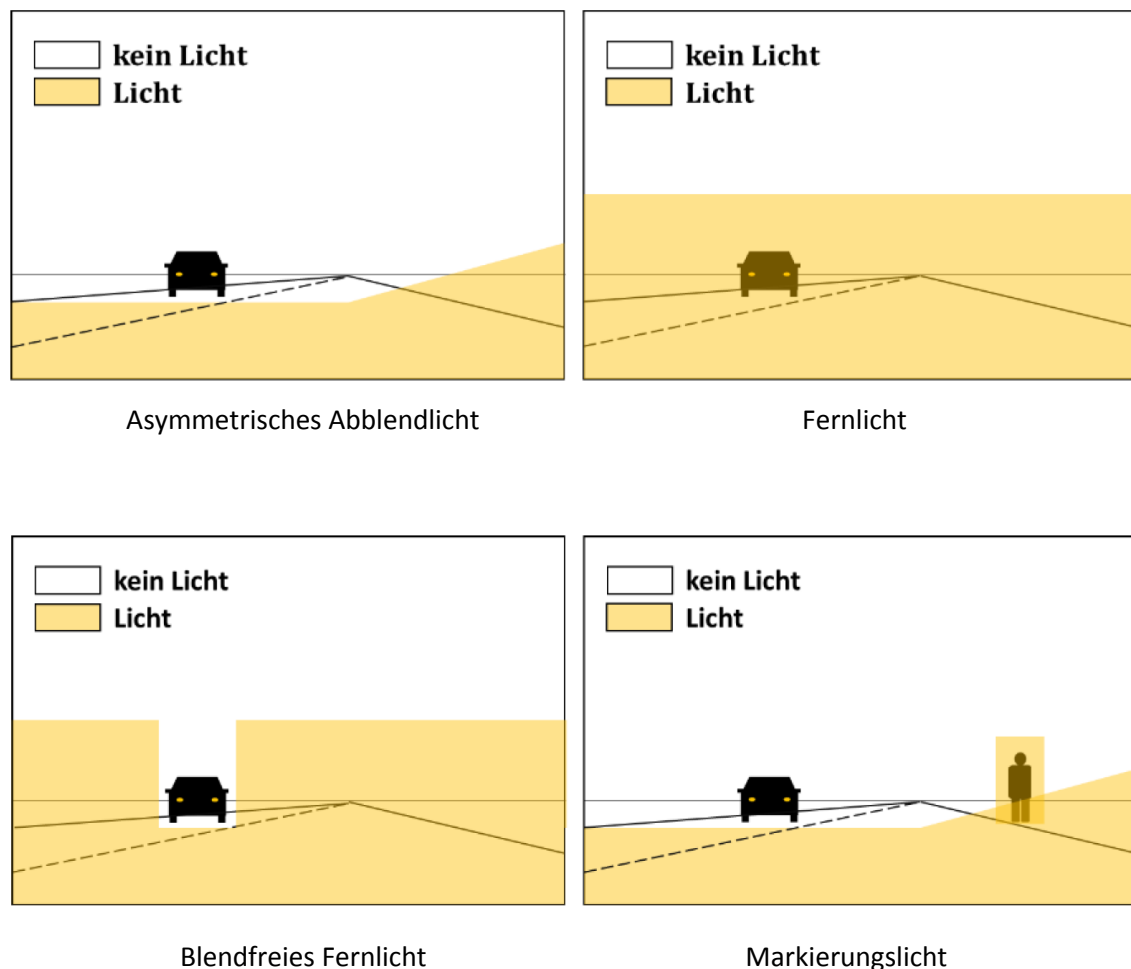


Abbildung 1.1: Lichtfunktionen und adaptive Frontbeleuchtungssysteme (ZYDEK 2014 [187])

In diesem Kontext dient die vorliegende Arbeit dazu, die wahrnehmungstechnischen Grundlagen einer räumlich und *spektral* variablen Lichtverteilung zu untersuchen. Dabei steht der Einfluss der spektralen Verteilung des Lichts im Umfeld auf die Detektion von Objekten an der Wahrnehmungsschwelle im Vordergrund. Es wird nicht nur auf relative Einflüsse eingegangen, sondern eine statistische Analyse einzelner Einflussparameter durchgeführt.

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt gegliedert:

Kapitel 2 beschreibt die für die Detektion und Wahrnehmung im Straßenverkehr wichtigen Grundlagen. Dazu wird auf den Aufbau des Auges und die lokale Verteilung sowie auf die Empfindlichkeit der verschiedenen Rezeptoren eingegangen. Es erfolgt eine Beschreibung der besonderen Anforderungen im nächtlichen Straßenverkehr anhand des Wahrnehmungsprozesses. Anhand der Erkenntnisse folgt die Beschreibung und Auswahl geeigneter Methoden zur Ermittlung der Detektion an der Wahrnehmungsschwelle sowie eine kontextbasierte Beschreibung geeigneter psychophysikalischer Methoden.

Kapitel 3 zeigt einen zusammenfassenden Überblick vorhandener Forschungsarbeiten in Bezug auf das Ziel der vorliegenden Arbeit. Basierend auf diesen Grundlagen erfolgt eine detaillierte Eingrenzung des Forschungsthemas anhand der Aufgabenstellung und der Definition von Zielen in Kapitel 4.

Kapitel 5 beschreibt den für die Durchführung der Wahrnehmungsversuche entwickelten Versuchsaufbau. Es werden die grundlegenden Komponenten sowie die bei deren Auswahl kritischen Punkte beleuchtet. Kapitel 6 widmet sich ausführlich der Kalibrierung der einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaus, um die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse sicherstellen zu können.

Zur Durchführung der Versuche erfolgt in Kapitel 7 anhand der Erkenntnisse aus der Literatur eine detaillierte Festlegung der einzelnen Versuchsparameter. Zudem wird auf die ausgewählte Versuchsmethodik, die Vorgehensweise bei der Durchführung der Untersuchungen sowie das ausgewählte Probandenkollektiv eingegangen.

Für die Verarbeitung der erhaltenen Rohdaten und die Durchführung der statistischen Signifikanzanalyse sind verschiedene auf die Form der Daten zugeschnittene statistische Werkzeuge erforderlich. Kapitel 8 zeigt die in diesem Zusammenhang durchgeführte Recherche, begründet die Auswahl der Methoden und stellt diese in einem Überblick vor.

Kapitel 9 stellt die Ergebnisse der anhand der statistischen Werkzeuge analysierten Rohdaten vor. Dabei wird auf die verschiedenen Einflussparameter im Detail eingegangen.

In Kapitel 10 werden die Ergebnisse dieser Arbeit mit ausgewählten recherchierten Studien aus Kapitel 3 verglichen und anhand der einzelnen Einflussparameter diskutiert. Zudem wird ein Wahrnehmungsmodell der CIE verwendet, um dessen Validität anhand der Daten dieser Arbeit zu überprüfen.

Kapitel 11 fasst die wesentlichen Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit in Kurzform zusammen. Es erfolgt eine kritische Betrachtung der Untersuchungen, eine Ableitung von Empfehlungen für die Praxis sowie ein Ausblick auf weiterführende Untersuchungen.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die lichttechnischen und augenphysiologischen Grundlagen beschrieben, die für das Verständnis der weiteren Arbeit und die Begründung der getroffenen Entscheidungen hilfreich sind.

2.1 Das visuelle System

Die visuelle Wahrnehmung zählt zu den komplexesten Aufgaben, die der Mensch durchführt, obwohl sie so scheinbar einfach und mühelos funktioniert (GREEN et al. 2008 [66]). Die Anforderungen an die Flexibilität und Leistungsfähigkeit des visuellen Systems sind dabei hoch. Beim Aufnehmen von visuellen Informationen aus der Umwelt wird zwischen mehreren physiologischen Grundfunktionen des Auges unterschieden. Hierzu zählen die Unterscheidung von Leuchtdichte- und Farbdifferenzen, das Wahrnehmen von Formen sowie die Geschwindigkeit der Wahrnehmung dieser drei Größen (HENTSCHEL 2002 [78]).

Nachfolgend wird der Aufbau des visuellen Systems mit seinen wesentlichen Eigenschaften näher beschrieben, um eine Grundlage für die spätere Auslegung des Versuchsaufbaus und die geeignete Auswahl der Methoden zu legen.

2.1.1 Aufbau des Auges

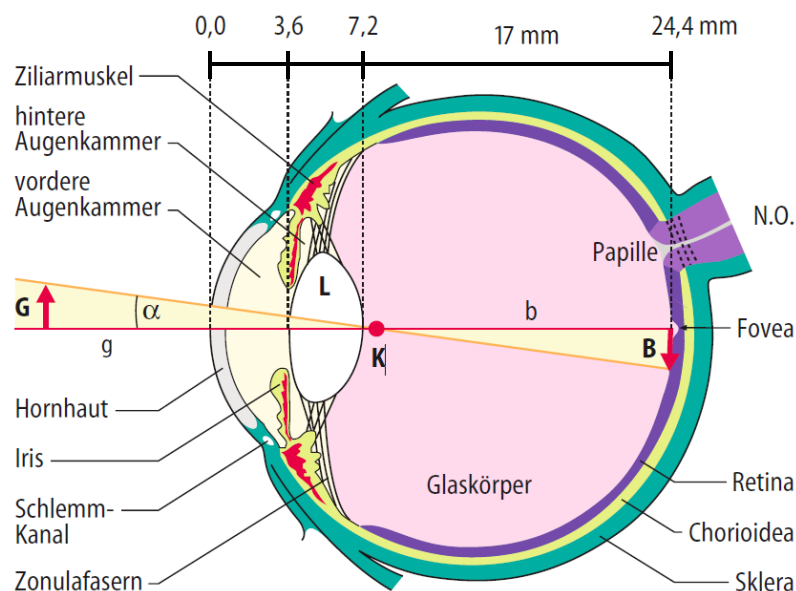


Abbildung 2.1: Aufbau des menschlichen Auges (Horizontalschnitt links)
L: Linse; α : Sehwinkel; N.O.: Sehnerv
nach SCHMIDT et al. 2005 [148]

Abbildung 2.1 zeigt einen Horizontalschnitt durch das menschliche Auge. Ein Gegenstand G wird unter dem Sehwinkel α über den optischen Apparat des Auges auf der Netzhaut (*Retina*) als Bild B abgebildet. Dabei passiert die elektromagnetische Strahlung auf dem optischen Pfad die Hornhaut, das Kammerwasser, die Augenlinse, den Glaskörper und das Nervengewebe der Netzhaut. Zuletzt wird sie von den Rezeptoren der Netzhaut absorbiert und in elektrische Signale gewandelt (vgl. ENDERS 1995 [50]).

Abbildung 2.2 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Netzhaut. Die Netzhaut ist wesentlich dafür verantwortlich, dass die ins Auge einfallende Strahlung in eine Licht-/Hellempfindung umgewandelt wird. Sie ist ein Teil des Gehirns und ist über den Sehnerv mit ihm verbunden. Sie besteht aus drei Schichten – den Ganglienzellen, einer Zwischenschicht und der eigentlichen Empfängerschicht, bestehend aus Stäbchen und Zapfen. Dabei liegen die Rezeptoren im Strahlengang räumlich hinter den beiden anderen Schichten. Durch die Verschaltungen der Ganglienzellen und der Zwischenschicht untereinander sowie ihre Verbindung mit den Rezeptoren findet bereits eine Vorverarbeitung der Signale statt, bevor diese über den Sehnerv an das Gehirn weitergeleitet werden (vgl. HENTSCHEL 2002 [78]).

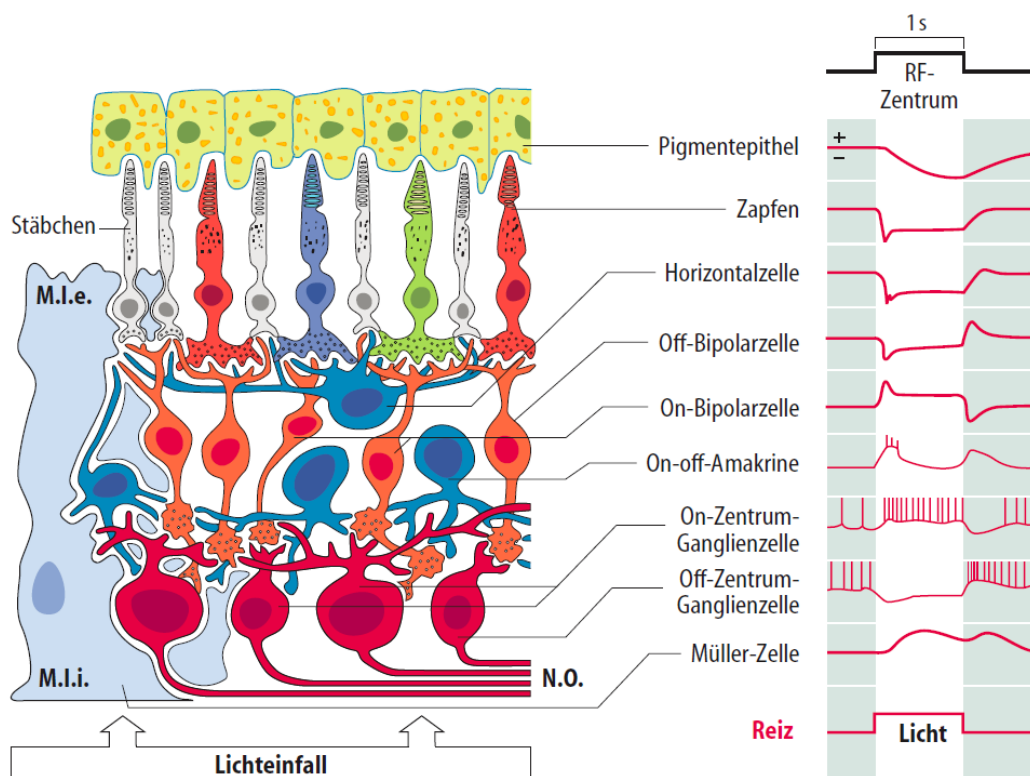


Abbildung 2.2: Aufbau der Netzhaut und Schema der Reaktion einzelner Neurone der Netzhaut auf einen Lichtreiz nach SCHMIDT et al. 2005 [148]

Die drei Zapfenarten sind für das Sehen am Tag, den photopischen Bereich (s. Abschnitt 2.1.3, S. 10), verantwortlich. Sie werden je nach maximaler spektraler Empfindlichkeit in Long- (LWS), Mid- (MWS) und Short-Wavelength-Sensitive (SWS)-Zapfen unterschieden. In der Kurzform werden auch die Buchstaben L, M, und S verwendet. Eine Bezeichnung als Rot-, Grün- und Blauzapfen ist nach

GEGENFURTNER & KIPER 2003 [58] missverständlich, da die Empfindlichkeiten nicht in diesen Bereichen liegen. Dennoch wird diese Notation in Anlehnung an die internationale Literatur auch in dieser Arbeit beibehalten.

Stäbchen weisen ihre maximale Empfindlichkeit in dunkler Umgebung auf (skotopischer Bereich; s. Abschnitt 2.1.3, S. 10). Sie besitzen eine deutlich höhere Absolutempfindlichkeit, ermöglichen jedoch nur ein Schwarzweiß-Sehen. Die Anpassung des Auges zwischen dem Tag- und Nachtsehen wird Adaptation genannt (vgl. Abschnitt 2.1.3, S. 10).

Zapfen und Stäbchen weisen räumlich eine unterschiedliche Dichte auf der Netzhaut auf. Die höchste Dichte an Zapfen ist unter dem Beobachtungswinkel $\theta = 0^\circ$ zu finden (vgl. Abbildung 2.3, links). Dieser Punkt wird *Fovea Centralis* genannt. In der Fovea sind keine Stäbchen vorhanden. Mit zunehmendem Beobachtungswinkel θ steigt die Anzahl der Stäbchen stark an, um bei etwa $\theta = 20^\circ$ ein Maximum zu erreichen. Von da an nimmt ihre Dichte zur Peripherie wieder ab.

In Abbildung 2.3 (links) ist die Dichte für alle drei Zapfenarten vereinfachend zusammengefasst dargestellt. In der Realität ist ihre Verteilung jedoch unterschiedlich. Im zentralen Bereich der Fovea, der *Foveola*, keine Blauzapfen vorhanden (vgl. GEGENFURTNER & KIPER 2003 [58], WALD 1967 [179]). Weitere Ausführungen zu den Besonderheiten der Verteilung der Blauzapfen beschreibt SPERLING 1980 [154]. Eine Übersicht zu Untersuchungen bezüglich der unterschiedlichen Dichteverteilungen der Farbrezeptoren zeigt FREIDING 2010 [54].

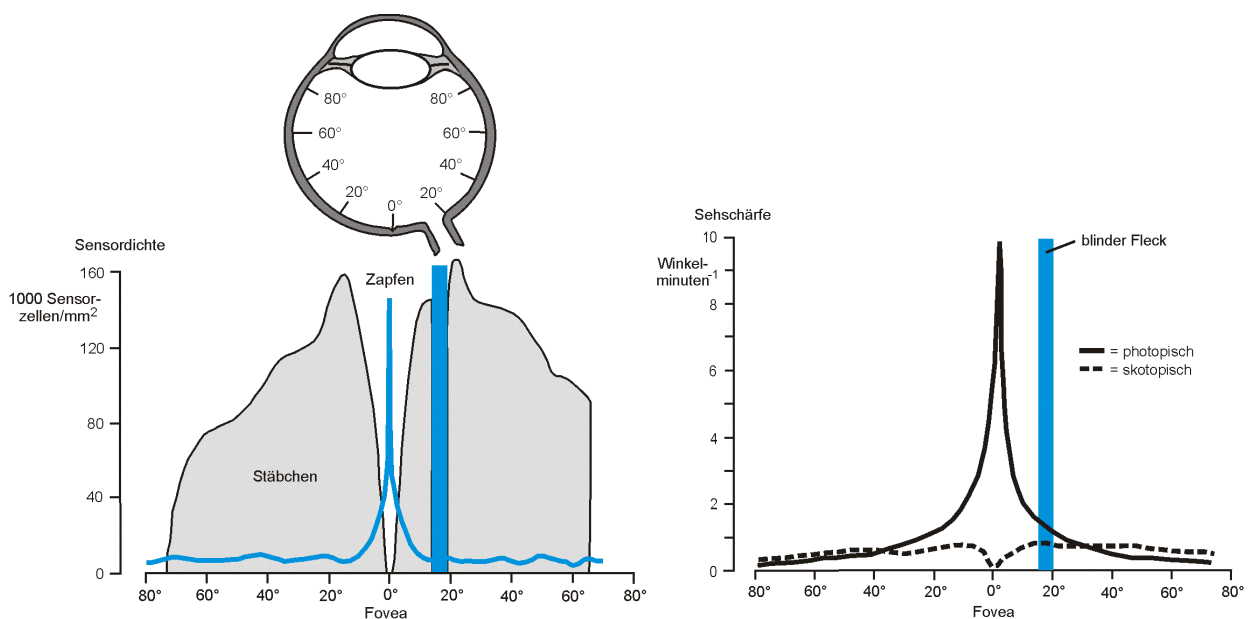


Abbildung 2.3: Dichte der Rezeptoren (links) und die Sehschärfe (rechts) aufgetragen ü. d. Beobachtungswinkel θ (MARÉES & HECK 2006 [119])

Abbildung 2.3 (rechts) verdeutlicht, dass die Fovea der Ort des deutlichsten Sehens ist. Sie bildet deshalb den Fixationspunkt bei Tage (vgl. HENTSCHEL 2002 [78]), wo nur Zapfen aktiv sind (vgl. HE et al. 1997 [76], HE et al. 1997 [75], GOODMAN 1997 [64]). Dies wird in Abbildung 2.1 deutlich. Der Beobachtungswinkel beträgt hier $\theta = 0^\circ$, so dass der Gegenstand direkt auf der Fovea abgebildet wird.

Durch die maximale Zapfendichte in der Fovea sowie ihre höchste Empfindlichkeit im photopischen Bereich erreicht die Sehschärfe tagsüber ihren Maximalwert. Bei völliger Dunkelheit (skotopisch adaptiertes Auge) ist die Sehschärfe um ein Vielfaches geringer und erreicht ihr Maximum mit zunehmender Stäbchendichte zwischen $\theta = 10^\circ - 20^\circ$.

Fazit:

Die unterschiedlichen Rezeptorarten – die Stäbchen und die drei Zapfenarten – sowie ihre vom Beobachtungswinkel θ abhängige Dichteverteilung sind zusammen mit der Anpassung auf die Umgebungshelligkeit (Adaptation) maßgebliche Einflussgrößen in der visuellen Wahrnehmung.

2.1.2 Rezeptorempfindlichkeiten und postrezeptorale Prozesse

DARTNALL, H. J. A. et al. 1983 [37] bestimmten die Empfindlichkeiten der Photopigmente der drei Farbrezeptoren. Sie ermittelten die Maxima zu $\lambda = 420, 530$ und 560 nm. Allerdings berücksichtigen diese Daten die spektralen Änderungen durch die vorgeschalteten Augenmedien nicht und können deshalb allenfalls durch entsprechende Anpassungen mit psychophysisch ermittelten Daten (z. B. WALD 1964 [178]) verglichen werden. Zudem reichen die reinen Pigmentempfindlichkeiten alleine nicht aus, um die Empfindlichkeit des visuellen Systems vollständig zu beschreiben. Besonders die maximalen Empfindlichkeiten der MWS-Zapfen bei $\lambda = 530$ nm und der LWS-Zapfen bei $\lambda = 560$ nm liegen sehr dicht nebeneinander. Eine Unterscheidbarkeit im grün-gelben Spektralgebiet ist damit nicht erklärbar (vgl. HAMM 1997 [73]).

Nach der Wandlung von Lichtreizen in elektrische Signale durch die Rezeptoren findet in den nachgeschalteten Ebenen der Netzhaut eine komplexe Vorverarbeitung der Signale in den Bipolar- und Ganglienzellen statt. Im Bereich der Fovea sind die Zapfen nahezu im Verhältnis 1:1 auf die Nervenfasern des Sehnervs verschaltet. In den peripheren Bereichen hingegen sind die Rezeptoren je Nervenfaser gebündelt angebunden (vgl. HAMM 1997 [73]). Die Stäbchen koppeln immer in Gruppen synaptisch an die Zapfen, bevorzugt an die SWS-Empfänger, an (vgl. STABELL & STABELL 1994 [158], BUCK 1985 [19]).

Nach der Vorverarbeitung werden die Signale über den Sehnerv zum seitlichen Kniehöcker (LGN) weitergeleitet, wo weitere Verarbeitungsprozesse stattfinden. Das Farbsehen entsteht dadurch, dass die Antworten der Zapfen additiv und differenziell zu einem unbunten Breitbandkanal und zu zwei nach HERING 1878 [79] benannten Gegenfarbenkanälen zusammengeschaltet werden (vgl. FREIDING 2010 [54], ENDERS 1995 [50]).

VOS & WALRAVEN 1971 [175] entwickelten ein Modell auf Basis der Gegenfarbentheorie von HERING mit seinen Opponentkanälen rot-grün und gelb-blau. Mit einem ähnlichen Konzept stellt auch MOLLON 1979 [124] die ersten Verarbeitungsstufen des Farbsehens dar. Jedoch werden hier die SWS-Zapfen beim achromatischen Kanal nicht berücksichtigt. Abbildung 2.4 fasst das Modell nach MOLLON 1979 [124] grafisch zusammen. Dabei werden die erregenden bzw. hemmenden Verbindungen der drei Zapfenarten (L, M, S) symbolisch durch positive oder negative Vorzeichen angedeutet. Auf diese Weise entsteht der Farb-Kanal (chromatischer Kanal) und der Leuchtdichte-Kanal (achromatischer Kanal). Der Begriff *Kanal* wird in diesem Zusammenhang jedoch nicht im physikalischen Sinn verstanden, sondern bezeichnet die allgemeine Übertragung von spezifischen Sehinformationen (vgl.

© 2015 Pearson Education, Inc. or its affiliate(s). All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or by any information storage or retrieval system, without prior written permission from the publisher.

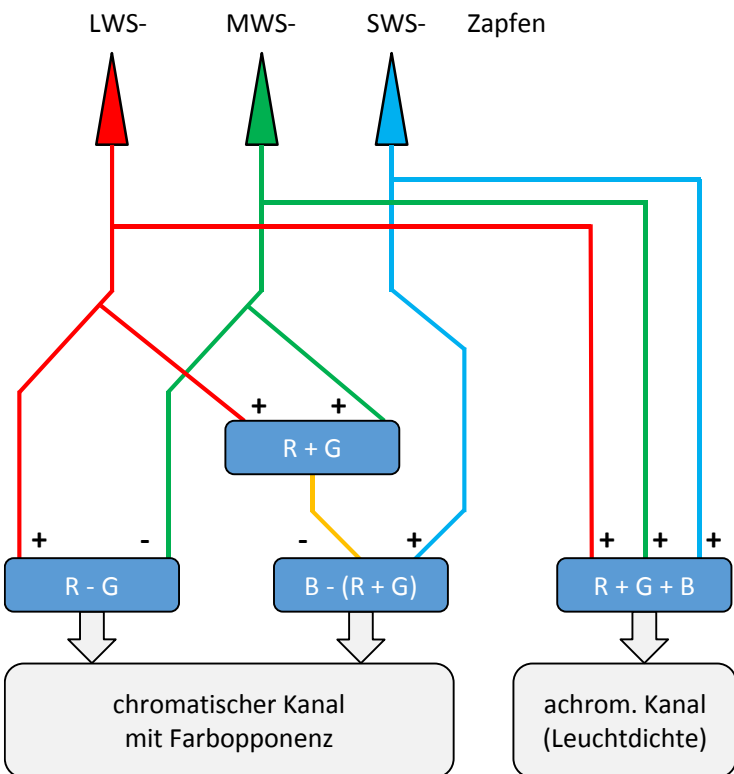


Abbildung 2.4: Schematisches Modell des Farbensehens
nach MOLLON 1979 [124], VOS & WALRAVEN 1971 [175]

STOCKMAN & SHARPE 2000 [163] ermittelten die spektralen Empfindlichkeiten der Zapfen für einen gefüllten Kreis als Sehzeichen der Größe $\alpha = 2^\circ$ und $\alpha = 10^\circ$ unter dem Beobachtungswinkel $\theta = 0^\circ$. Abbildung 2.5 zeigt die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen für $\alpha = 2^\circ$ sowie die daraus abgeleiteten Opponentenmechanismen nach VOS & WALRAVEN 1971 [175] in normierter Form. Der achromatische Kanal berücksichtigt in diesem Fall keinen Anteil der S-Zapfen.

Aus Abbildung 2.5 wird deutlich, wie sehr sich die Empfindlichkeiten der L- und M-Zapfen überlagern. Zudem decken sie fast den gesamten sichtbaren Bereich ab.

Fazit:

Die spektralen Empfindlichkeiten der Farbrezeptoren alleine reichen zur Beschreibung des Farbsehens nicht aus. Die der Rezeptorschicht nachgelagerten Zellschichten sorgen durch ihre komplexe Verschaltung für eine Vorverarbeitung der Zapfensignale. Dies geschieht durch additive und subtraktive Vergleiche in den Horizontal- und Ganglienzellen (s. Abbildung 2.2, S. 6). Als Ergebnis entstehen ein Farbkanal mit zwei Anteilen und ein Leuchtdichtekanal (vgl. Abbildung 2.4). Die Stäbchen sind bei der Farbwahrnehmung von untergeordneter Bedeutung. Im Bereich des Dämmerungssehens (mesopisch) ist ein Einfluss bekannt (vgl. STABELL & STABELL 1998 [156], STABELL & STABELL 2002 [157], KNIGHT et al. 1998 [97]).

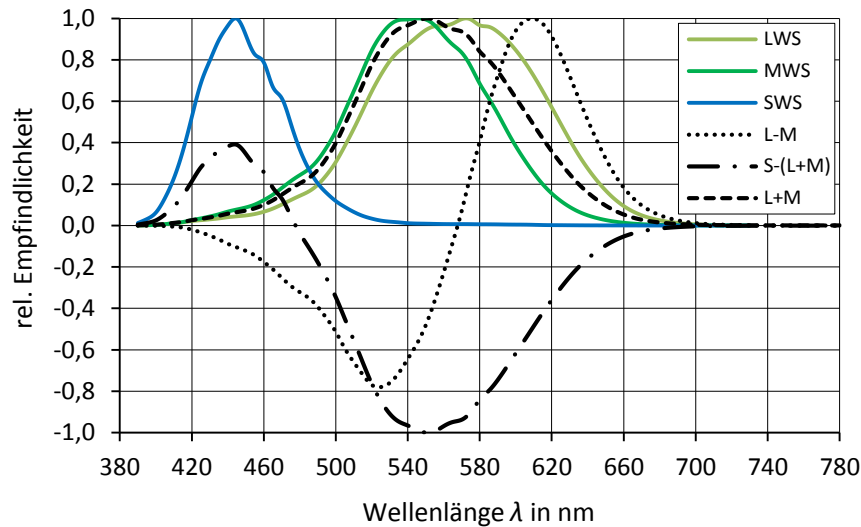


Abbildung 2.5: Spektrale Empfindlichkeiten der Zapfen und Opponentmechanismen nach STOCKMAN & SHARPE 2000 [163]

2.1.3 Adaptation und mesopische Wahrnehmung

Die Leistungsfähigkeit des menschlichen Auges ist direkt an die Adaptationsleuchtdichte (Umfeldleuchtdichte) L_U gekoppelt (vgl. SCHMIDT-CLAUSEN & FREIDING 2004 [150], GALL & THIELE 1968 [57]). Die Fähigkeit des visuellen Systems sich an stark unterschiedliche Umgebungshelligkeiten anzupassen wird als Hell- bzw. Dunkeladaptation bezeichnet. Diese liegt nach DAMASKY 1995 [36] etwa im Bereich von $10^{-8} \text{ cd/m}^2 < L_U < 10^6 \text{ cd/m}^2$. Dabei verändert sich die Empfindlichkeit der Netzhaut durch photochemische und neuronale Anpassungsprozesse (vgl. SCHMIDT et al. 2005 [148], SILBERNAGL et al. 2001 [153]). Abbildung 2.6 zeigt die ermittelten zeitlichen Verläufe der Dunkeladaptation der Zapfen und Stäbchen nach HENTSCHEL 2002 [78]. Nach dem „Bleichen“ der Empfänger durch ein Adaptationsfeld mit hoher Leuchtdichte (photopisch adaptiert) wird dieses abgeschaltet. Über die Zeitdauer von 25 Minuten wird anschließend über die Variation der Leuchtdichte eines Testfeldes der aktuelle Adaptationszustand der Rezeptoren ermittelt.

Da die Adaptation je nach Testperson nie konstant verläuft, sind in Abbildung 2.6 Adaptationsbänder mit oberen und unteren Grenzen dargestellt. In den ersten Minuten wird die Adaptation von den Zapfen dominiert. Dann wird deutlich, dass die Zapfen bereits nach ca. 7 - 8 Minuten ihre Empfindlichkeitsschwelle erreicht haben und keinen Beitrag mehr leisten. Dies ist bei etwa $0,001 \text{ cd/m}^2$ Testfeldleuchtdichte der Fall. Die Stäbchen erreichen ihre maximal Empfindlichkeit asymptotisch erst bei etwa 10^{-6} cd/m^2 . Während die vollständige Dunkeladaptation nach ca. 30 - 60 Minuten abgeschlossen ist (skotopische Adaptation), verläuft die Helladaptation im Bereich einiger Sekunden bis zu einer Minute deutlich schneller (vgl. GREEN et al. 2008 [66]). Oberhalb von $L_U = 10^3 \text{ cd/m}^2$ tritt Blendung ein (vgl. DAMASKY 1995 [36]).

Nach GRAMBERG-DANIELSEN et al. 1984 [65] ist die Dunkeladaptation vom photopischen Bereich in den mesopischen Bereich bereits nach 3 - 5 Minuten erreicht.

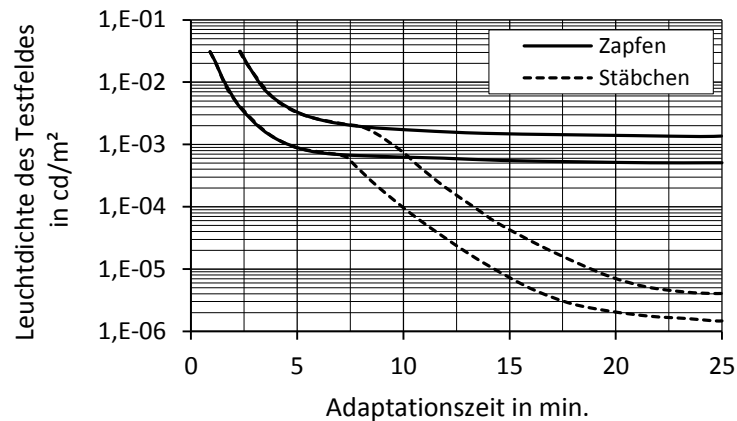


Abbildung 2.6: Dunkeladaptation der Zapfen und Stäbchen
nach Ausschalten des Adaptationsfeldes
nach HENTSCHEL 2002 [78]

Je nach Umfeld-/Adaptationsleuchtdichte werden nach DIN 5031-3 [42] drei Bereiche der Adaptation unterschieden. Die Werte in eckigen Klammern beziehen sich auf CIE 86 [29]:

- *Photopisch (Tagessehen = Zapfen aktiv):* $L_U > 10^2$ [3] cd/m^2
- *Mesopisch (Dämmerungssehen = Zapfen + Stäbchen aktiv):* 10^2 [3] $\text{cd/m}^2 > L_U > 10^{-5}$ cd/m^2
- *Skotopisch (Nachtsehen = Stäbchen aktiv):* $L_U < 10^{-5}$ cd/m^2 .

Dabei sind die Grenzen in der Literatur unterschiedlich definiert. In der DIN 5031-2 [43] befindet sich der Kommentar, dass für *praktische Zwecke* als Grenze zwischen photopisch/mesopisch $L_U = 10 \text{ cd/m}^2$ und als Grenze zwischen mesopisch/skotopisch $L_U = 10^{-3} \text{ cd/m}^2$ verwendet werden können. So finden sich in Veröffentlichungen der *Internationalen Beleuchtungskommission (CIE)* für den mesopischen Bereich Angaben „von einigen Hundertstel cd/m^2 oder weniger bis mindestens einige cd/m^2 “ (CIE 81 [28]). Bei HALONEN & ELOHOLMA 2005 [72] ist zu lesen: „zwischen $0,001 \text{ cd/m}^2$ und *mindestens einigen cd/m^2* “. In einer aktuelleren Publikation der CIE wird der mesopische Bereich zwischen dem photopischen und skotopischen Bereich, „d.h. zwischen etwa $0,001 \text{ cd/m}^2$ und 10 cd/m^2 “ angegeben (CIE 191:2010 [33]). Für die praktische Anwendung wird als untere Grenze auch der Wert $0,01 \text{ cd/m}^2$ verwendet (GRAMBERG-DANIELSEN et al. 1984 [65]). Eine Übersicht über die verschiedenen Grenzen der Bereichsdefinition in der Literatur zeigt SCHÄFER 2012 [143].

Der beschriebene Sachverhalt macht deutlich, dass sich der mesopische Bereich aus Sicht einer wahrnehmungsgerechten Beschreibung des visuellen Systems als besonders schwierig gestaltet. Sowohl die Zapfen, als auch die Stäbchen tragen zur Wahrnehmung bei. Bereits eine kleine Änderung der Umgebungsbedingungen hat eine messbare Änderung der Wahrnehmung zur Folge. Gerade im mesopischen Bereich finden zahlreiche Anwendungen des Alltags statt, beispielsweise der nächtliche Straßenverkehr. Hier sind sowohl das foveale, als auch das periphere Sehen von Bedeutung (vgl. CIE 191:2010 [33], BOYCE 2003 [16]).

Beim Übergang der Adaptation vom photopischen zum skotopischen Bereich findet eine Verschiebung der spektralen Hellempfindlichkeit vom langwelligen in den kurzwelligen Spektralbereich statt.

Dieser Effekt wurde erstmals von *Purkinje* (PURKINJE 1819 [136]) beschrieben und nach ihm benannt (vgl. DIN 5031-2 [43]).

Fazit:

Die Adaptation spielt eine entscheidende Rolle bei der visuellen Wahrnehmung und entsprechend durchgeführten Wahrnehmungsversuchen. Um konstante Versuchsbedingungen zu erhalten, muss je nach Adaptationsleuchtdichte L_0 vor Versuchsbeginn eine ausreichende Adaptationszeit eingehalten werden. Der mesopische Bereich ist in Bezug auf die Wahrnehmung besonders komplex. Dennoch ist gerade hier der nächtliche Straßenverkehr einzuordnen.

2.1.4 Der Prozess der Wahrnehmung

Der visuelle Prozess gliedert sich nach SCHMIDT-CLAUSEN & FREIDING 2004 [150] und GRAMBERG-DANIELSEN et al. 1984 [65] im Wesentlichen in drei Schritte:

- Sehen,
- Wahrnehmen und
- Erkennen.

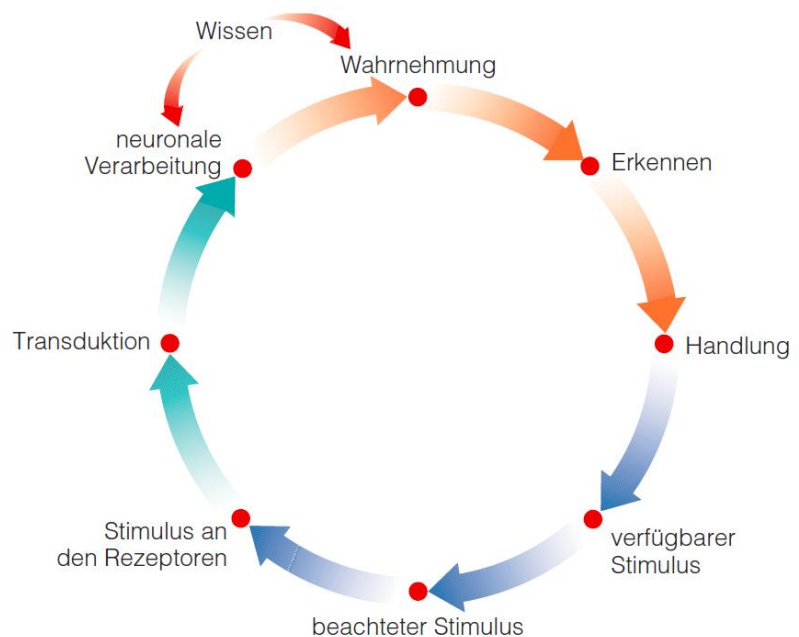
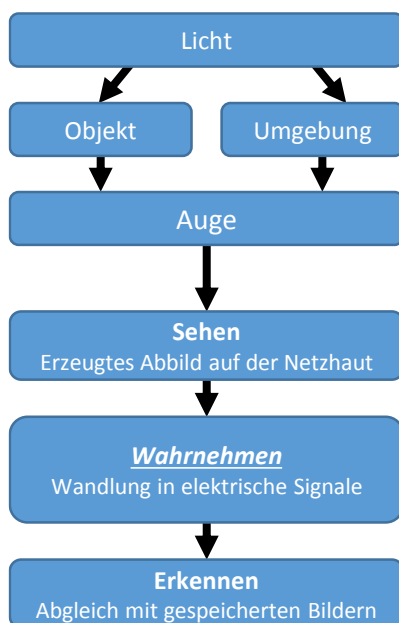


Abbildung 2.7: Verarbeitung und Prozesse im visuellen System

links: drei Schritte nach SCHMIDT-CLAUSEN 1990 [149]

rechts: Wahrnehmungsprozess nach GOLDSTEIN et al. 2008 [62]

Dies wird am Beispiel der Automobilbeleuchtung deutlich. Die Kraftfahrzeugscheinwerfer beleuchten ein Objekt und seine Umgebung. Von *Sehen* wird gesprochen, wenn diese Szene auf der Netzhaut des Beobachters abgebildet wird. Das in der Netzhaut in Serien elektrischer Impulse umgesetzte Licht wird über Nervenbahnen zur Sehrinde des Gehirns geleitet. Es wird dabei davon ausgegangen,

dass eine gewisse Mindestanregung der Rezeptoren überschritten werden muss. Das Licht erzeugt ein Bild, das *Wahrnehmen* findet statt. Wird dieses Bild im Gehirn mit bereits gespeicherten Bildern verglichen, tritt die 3. Stufe dieses Prozesses, das *Erkennen* ein (vgl. SCHMIDT-CLAUSEN 1990 [149]). Abbildung 2.7 (*links*) zeigt die drei wesentlichen Schritte des visuellen Prozesses in grafischer Form.

Der Vorteil des Modells nach SCHMIDT-CLAUSEN ist die einfache und intuitive Verständlichkeit. Für eine detailliertere Betrachtung der komplexen Vorgänge im Auge reicht diese Abstraktionsebene jedoch nicht aus. GOLDSTEIN et al. 2008 [62] zeigen in Abbildung 2.7 (*rechts*), dass die Vorgänge deutlich komplexer sind und beschreiben die Wahrnehmung als geschlossenen Prozess. Blaue Pfeile beschreiben den Stimulus, türkisfarben sind Verarbeitungsprozesse und orangefarben perzeptuelle Antworten dargestellt. Die drei Grundschrte des visuellen Prozesses nach SCHMIDT-CLAUSEN bleiben jedoch erhalten.

Vor dem Sehen (Stimulus an den Rezeptoren) sind nach GOLDSTEIN zuvor ein verfügbarer Stimulus sowie seine Beachtung erforderlich. Für die Wahrnehmung hingegen sind zuvor die Wandlung des Lichtreizes in elektrische Signale (Transduktion) sowie neuronale Verarbeitungsschritte erforderlich. Das Erkennen bedeutet auch bei GOLDSTEIN, Wahrgenommenes durch Abgleich mit Bekanntem in Kategorien einzuordnen.

Als Abschluss des gesamten Prozesses erfolgt das eigentliche Ziel der beschriebenen Verarbeitung - eine Handlung. Nachfolgend wird auf die Bedeutung der Handlung und ihrer notwendigen Voraussetzungen in der Praxis näher eingegangen.

2.1.5 Detektion, Kontrast und Schwelle

Auf die Praxis bezogen – beispielsweise im Straßenverkehr – ist es entscheidend, eine kritische Situation zum frühestmöglichen Zeitpunkt einzuschätzen, um entsprechend rechtzeitig reagieren zu können. Dies kann das Einleiten eines Bremsvorganges oder das Ausweichen um ein Objekt herum sein.

Betrachtet man den Alltag der Unfallbegutachtung, so stellen GREEN et al. 2008 [66] fest: „Detection is the most common issue in personal injury litigation.“ Häufig gilt es vor Gericht Fragen zu klären wie: Hätte der Autofahrer den stehenden LKW detektieren können/müssen? Aus einer derartigen Fragestellung soll abgeleitet werden, ob der Unfall hätte vermieden werden können. Dabei unterscheiden die Autoren zwischen Detektion und Diskrimination. Während die Diskrimination beispielsweise das Unterscheiden von Farben und Objekten beschreibt, bezieht sich die Detektion auf das bloße Vorhandensein eines Objektes oder Reizes. Auch nach FREIDING et al. 2007 [55] ist die Detektion die grundlegendste der drei wichtigsten Sehaufgaben im Straßenverkehr ausgedrückt durch die Frage „Can it be seen?“.

Aus der Beschreibung wird deutlich, dass die Begriffe *Detektion* und *Diskrimination* synonym zu den Stufen *Wahrnehmen* und *Erkennen* des in Abschnitt 2.1.4 beschriebenen visuellen Prozesses verwendet werden (vgl. auch GREULE 1993 [68]). Die Ursache für eine Wahrnehmung bzw. Nicht-Wahrnehmung als Basis für die weitere Verarbeitung und das anschließende Einleiten einer Reaktion beschreibt die klassische Psychophysik mit *Schwellen* (vgl. Abschnitt 2.2.2, S. 18). Die Grundlage für die

Wahrnehmung ist dabei immer ein wahrnehmbarer Unterschied von einem Objekt zu seinem Umfeld. Da dieser Unterschied jedoch vom Hintergrund abhängt, wird in der Praxis der Quotient aus beiden gebildet. Daraus ergibt sich die als Kontrast bezeichnete Größe der Lichtunterschiedsempfindlichkeit (GRAMBERG-DANIELSEN et al. 1984 [65]) nach Gleichung 2.1. Als lichttechnische Größe zur Beschreibung des Kontrastes wird hier die Leuchtdichte verwendet.

$$K_W = \frac{L_O - L_U}{L_U} = \frac{\Delta L}{L_U} \quad \text{Kontrast nach Weber} \quad 2.1$$

mit:

K_W Leuchtdichtekontrast nach Weber mit $-1 \leq K_W \leq 1$

L_O Leuchtdichte des Objektes (Testzeichen)

L_U Leuchtdichte des Hintergrundes (Adaptation)

Dieser Kontrast ist die maßgebliche Größe im mesopischen Bereich, um ein Objekt wahrnehmen zu können. Er wird auch als physiologischer Kontrast bezeichnet (LANGE 1992 [108]). In der Literatur gibt es je nach Anwendung weitere Kontrastdefinitionen wie die Modulation (Michelson-Kontrast) oder den einfachen Kontrast (vgl. BACH et al. 2008 [7], MISCHLER 2011 [123]). Für die alltägliche Wahrnehmung und Unfallbegutachtung ist jedoch nur die Definition nach Gleichung 2.1 relevant, da sie die reale Situation für die Wahrnehmbarkeit eines Objektes in einem Umfeld am besten darstellt.

Fazit:

Verknüpft man den visuellen Prozess mit dem Unfallgeschehen im alltäglichen Verkehr so wird zusammenfassend deutlich: die *erste Wahrnehmung* des visuellen Systems ist die entscheidende Grundlage dafür, dass eine aktive Reaktion erfolgen und ein Unfall vermieden werden kann (vgl. auch FREIDING 2010 [54]). Die Voraussetzung für eine erste Wahrnehmung bildet wiederum das Vorliegen eines Kontrastes. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse wird im Folgenden ein Verfahren gesucht, das die erste Wahrnehmung auf Basis der vorhandenen Kontraste in Abhängigkeit der Umfeldparameter ermitteln kann.

2.1.6 Spektrale Hellempfindlichkeitsgrade

Die spektrale Hellempfindlichkeit ist eine Bewertungsfunktion, um die elektromagnetische Strahlung gemäß dem menschlichen Helligkeitseindruck zu gewichten (vgl. FREIDING 2010 [54]). Die Anfänge der Bestrebung die Hellempfindung des menschlichen Auges in Abhängigkeit von der Lichtfarbe zu beschreiben und zu messen – die so genannte Photometrie – gehen bereits auf LAMBERT 1760 [107] zurück. Gemeinsame internationale Bestrebungen begannen zu Anfang des 20. Jahrhunderts. Im Jahr 1903 wurde die *Commission Internationale de Photometrie* gegründet, deren Name direkt das Ziel der Organisation widerspiegelt. Als Nachfolgeeinrichtung entstand 1920 die *Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)*, die bis heute existierende Internationale Beleuchtungskommission. Nachfolgend werden die wichtigsten Grundlagen auf diesem Gebiet im Kontext der vorliegenden Arbeit beschrieben.

2.1.6.1 Photopischer und skotopischer Bereich

Die CIE stellte im Jahr 1924 die erste Empfindlichkeitsfunktion vor, die international als spektraler Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ für das Tagessehen standardisiert wurde (vgl. CIE 18.2 [27]). Die Bedingungen unter denen $V(\lambda)$ ermittelt wurde, legte die CIE als Referenz fest. Als Sehwinkel wurde ein Wert von $\alpha = 2^\circ$ und als Beobachtungswinkel der Wert $\theta = 0^\circ$ verwendet. Zudem sollte die Empfindlichkeitsfunktion für das Tagessehen (photopisch) und damit streng genommen nur für $L_U > 100 \text{ cd/m}^2$ ihre Gültigkeit besitzen. Die CIE definierte dies als *photometrischen 2° -Normalbeobachter*.

Dabei ist hervorzuheben, dass die $V(\lambda)$ -Funktion nicht auf Erkenntnissen einer zentral angelegten Untersuchung basiert. Die Daten wurden von GIBSON & TYNDALL, E. P. T. 1923-24 [61] aus zahlreichen verschiedenen Untersuchungen zusammengeführt. Diese Untersuchungen wurden unter unterschiedlichen Bedingungen und mit verschiedenen Methoden durchgeführt. Dabei ist fraglich, ob die Bedingungen für vollständig photopische Adaptation gegeben waren (vgl. HYDE et al. 1918 [80], VIIKARI et al. 2005 [171]). Als Methoden dienten u.a. die Flimmerphotometrie, der Kleinschritt-Direktvergleich und der direkte Helligkeitsabgleich. Auf die Eigenschaften einzelner Methoden wird in Abschnitt 2.2 auf S. 18 näher eingegangen (vgl. auch ENDERS 1995 [50]). Aus den Ergebnissen wurde die $V(\lambda)$ -Funktion aus verschiedenen spektralen Abschnitten zusammengesetzt (vgl. WYSZECKI & STILES 2000 [183]).

Im Jahr 1951 definierte die CIE den spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V'(\lambda)$ für das Nachtsehen. Für das Stäbchensehen im skotopischen Bereich wurde so der *10° -Normalbeobachter* definiert ($\alpha = 10^\circ$ und $\theta = 0^\circ$). Auch hier wurden unterschiedliche Methoden und Sehwinkel aus den Untersuchungen von CRAWFORD 1949 [34] und WALD 1945 [177] kombiniert, um die $V'(\lambda)$ -Funktion zu erhalten.

In weiteren Untersuchungen stellte bereits JAINSKI 1938 [86] fest, dass insbesondere der kurzwellige Spektralbereich bei der $V(\lambda)$ -Funktion unterbewertet ist. Dies ist teilweise auch durch die Untersuchungsmethodik begründbar. ENDERS 1995 [50] weist darauf hin, dass bei Schwellenuntersuchungen mit $\alpha > 1^\circ$ eine Beteiligung der Stäbchen einen merklichen Einfluss auf die Hellempfindlichkeit ausübt. Die Flimmerphotometrie hingegen unterdrückt die Anteile einiger Rezeptoren (vgl. Abschnitt 2.2.1, S. 18). JUDD 1951 [89] schlägt eine Korrektur der $V(\lambda)$ -Funktion vor. VOS 1978 [173] greift die vorgeschlagenen Ideen von JUDD auf und vervollständigt diesen Ansatz, so dass die Daten statt in 10 nm-Intervallen nun in 1 nm-Schritten vorliegen. 1988 werden die Daten als Modifikation nach JUDD und VOS von der CIE unter der Bezeichnung $V_M(\lambda)$ veröffentlicht (vgl. CIE 86 [29]).

Abbildung 2.8 zeigt die drei beschriebenen spektralen Hellempfindlichkeitsgrade $V(\lambda)$, $V_M(\lambda)$ und $V'(\lambda)$ in linearer Darstellung (links) und logarithmischer Skalierung (rechts). Es ist zu erkennen, dass die Modifikation durch $V_M(\lambda)$ lediglich im Bereich $\lambda < 450 \text{ nm}$ einen Einfluss hat. Bis heute findet $V_M(\lambda)$ in der Praxis der Lichtmesstechnik ebenso wie $V'(\lambda)$ keine wirkliche Anwendung. Alle lichtmesstechnischen Einrichtungen verwenden als Basis $V(\lambda)$ als Größe zur Beschreibung der menschlichen Hellempfindung.

In den folgenden Jahrzehnten wurden zahlreiche weitere Untersuchungen angestrebt, um einen einheitlichen und allgemeingültigen spektralen Hellempfindlichkeitsgrad auf Basis einer einzigen Me-

thode zu ermitteln, wie z.B. CIE 75-1988 [32]. 1978 fasste die CIE alle bekannten Methoden zur Ermittlung der spektralen Hellempfindung zusammen und diskutierte die Vor- und Nachteile dieser Methoden und der daraus entwickelten Empfindlichkeitsfunktionen (vgl. CIE 41 [26]).

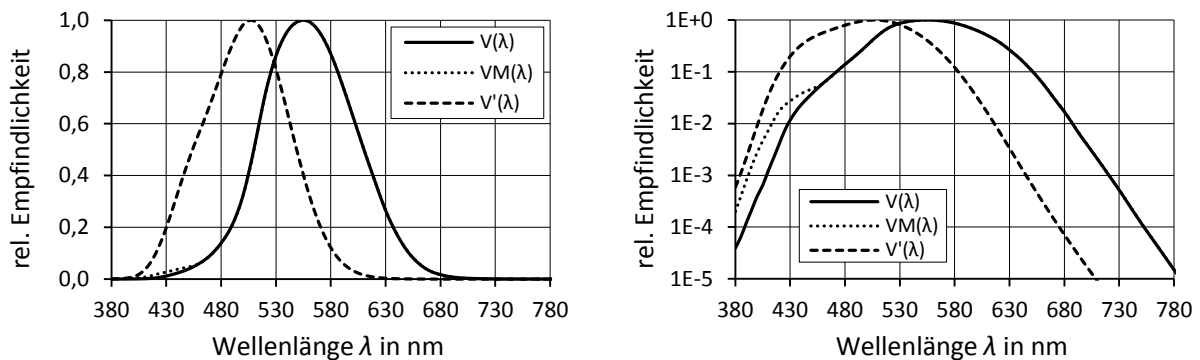


Abbildung 2.8: Spektrale Hellempfindlichkeitsgrade $V(\lambda)$, $V_M(\lambda)$, $V'(\lambda)$
links: linear; rechts: logarithmisch aufgetragen
nach CIE 18.2 [27], CIE 86 [29]

2.1.6.2 Mesopischer Bereich

Die unlösbar erscheinenden Herausforderungen bei der Standardisierung der spektralen Hellempfindung werden im mesopischen Bereich besonders deutlich. Während im tiefen photopischen und skotopischen Bereich (vgl. Abschnitt 2.1.3, S. 10) jeweils nur die Zapfen oder Stäbchen aktiv sind, kombinieren sie ihre Aktivität im mesopischen Bereich. Viele Anwendungen des Alltags erfolgen jedoch nicht im vollständig photopischen, erst recht nicht im völlig skotopischen Bereich. In Untersuchungen zeigte sich, dass sich je nach Veränderung der Untersuchungsparameter jeweils andere Empfindlichkeitsfunktionen mit daraus resultierenden Kurvenschaaren ergaben. Nach DAMASKY 1995 [36], HARTGE 1990 [74] u.a. lassen sich die wesentlichen Einflussparameter wie folgt zusammenfassen:

- Leuchtdichte des Adaptationsfeldes L_U
- Größe des Objektes, Sehwinkel α
- Farbe des Objektes (spektrale Zusammensetzung)
- Leuchtdichte des Objektes L_O
- Lage des Objektes im Gesichtsfeld (Beobachtungswinkel θ)
- Blendung
- Untersuchungsmethode
- Darbietungszeit t_d .

Als Kompromiss für die Anwendung im mesopischen Bereich wurde versucht, eine Gewichtung auf Basis der zwei Faktoren $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$ u.a. durch die Methode des direkten Helligkeitsabgleiches zu verwenden (vgl. CIE 81 [28]). KOKOSCHKA 1972 [100] entwickelte hingegen ein Modell zur Hellempfindung auf Basis der vier Rezeptorempfindlichkeiten der Netzhaut. Nach FREIDING 2010 [54] sind alle mesopischen Modelle auf einen dieser beiden Ansätze zurückzuführen. Dabei ist zu berücksichtigen,

dass die Hellempfindlichkeit nicht mit der für die Wahrnehmung beschriebenen Kontrastwahrnehmung übereinstimmt.

Die Untersuchungen in den folgenden Jahrzehnten bezüglich der mesopischen Detektion beschränken sich im Wesentlichen auf die Variation der Untersuchungsmethodik und/oder der untersuchten Parameter. Auf eine Beschreibung wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Übersicht in FREIDING 2010 [54] verwiesen. Als Ergebnis aller Bemühungen veröffentlichte die CIE im Jahr 2010 zwei Modellvorschläge als Empfehlung für die Anwendung im mesopischen Bereich (vgl. CIE 191:2010 [33]). Die Vorschläge beruhen auf den Untersuchungen von REA et al. 2004 [138] zum USP-System und GOODMAN et al. 2007 [63] aus dem MOVE-Projekt (vgl. ELOHOLMA & HALONEN 2005 [49]). Beide Modellvorschläge beruhen auf einer Gewichtung von $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$. Ein Vergleich mit den Daten der vorliegenden Arbeit erfolgt in Abschnitt 10.7 auf S. 114.

Fazit zu Abschnitt 2.1.6:

Die spektrale Hellempfindung ist sehr komplexen und ständigen Anpassungsprozessen unterworfen. Neben individuellen Schwankungen von Person zu Person ist eine Vielzahl von Einflussparametern dafür verantwortlich. Folglich ist es in der Praxis nicht möglich, diesen dynamischen Vorgang mit einer vereinheitlichten „Standardfunktion“ zu beschreiben, die ihre Gültigkeit für jedes Individuum und jede Bedingung besitzt. In den letzten 100 Jahren der Photometrie sind zahlreiche spektrale Hellempfindlichkeitsfunktionen und Modelle der mesopischen Detektion entstanden. Diese gelten jedoch streng genommen immer nur für die bei der Datenerhebung genutzten Bedingungen – ohne Gültigkeit für eine Verallgemeinerung. Dies gilt auch für $V(\lambda)$ als Hellempfindlichkeitsfunktion.

Die CIE fasst die Schwächen der $V(\lambda)$ -Funktion wie folgt in drei Gruppen zusammen (CIE 41 [26]):

- „First the $V(\lambda)$ curve itself may be in error, not representing adequately the average observer.
- Second, the $V(\lambda)$ curve may be used in situations for which it is inappropriate. (The most obvious example is the use of the photopic or daylight $V(\lambda)$ curve for night vision, but there are many other instances of its misuse as well.)
- Finally, the assumption of linear additivity of the contributions of different wavelengths [...] may be wrong. This problem arises because of the physiology of the visual system and requires understanding of when and why the additivity assumption fails.“

Ungeachtet dieser Einschränkungen bildet die $V(\lambda)$ -Funktion bis heute die (alleinige) Grundlage für alle verwendeten lichtmesstechnischen Instrumente wie beispielsweise Luxmeter, Leuchtdichtekameras und Goniophotometer.

Für Untersuchungen zur Wahrnehmung und Hellempfindlichkeit im mesopischen Bereich lässt sich aus den gewonnenen Erkenntnissen festhalten: eine Methode gilt dann als geeignet, wenn sie:

- reale Sehaufgaben nachbildet,
- dabei alle Rezeptoren der Netzhaut berücksichtigt und
- die aufgelisteten Einflussparameter unter kontrollierbaren Bedingungen flexibel variierbar sind.

2.2 Ermittlung der spektralen Empfindlichkeit

Bevor auf ein geeignetes Verfahren zur Bestimmung der ersten Wahrnehmung näher eingegangen wird, wird einleitend eine kurze Übersicht der möglichen Alternativen gegeben. Als Grundlage der meisten Verfahren dient indirekt oder direkt die Helligkeit als Kriterium in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ .

2.2.1 Methodenübersicht

Bereits Lambert beschreibt in seinem Werk „Lamberts Photometrie“, dass er die Helligkeit von Licht und Farben in geeigneter Weise verändert hat, so dass sie dem Auge nach gleich wirken (vgl. LAMBERT 1760 [107]). Diese grundlegende Eigenschaft besitzen alle Verfahren, mit den die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges ermittelt werden kann. Mit den Bestrebungen zur Ermittlung einer „Standardkurve“ für die menschliche Hellempfindung sind insbesondere im 20. Jahrhundert viele Untersuchungen mit sehr unterschiedlichen Methoden durchgeführt worden. Diese führen jedoch auch zu unterschiedlichen Ergebnissen.

HARTGE 1990 [74] unterteilt die Methoden in „Methoden mit Helligkeitsabgleich“ und „Sondermethoden“. ENDERS 1995 [50] präzisiert diese Gruppierung und fasst 16 unterschiedliche Untersuchungsmethoden mit ihren Abgleichkriterien zusammen. Er gliedert sie analog zu HARTGE 1990 [74] in zwei Gruppen. Gruppe 1 nutzt direkt die Helligkeit als Abgleichkriterium, Gruppe 2 verwendet Hilfskriterien zur Bestimmung des spektralen Hellempfindlichkeitsgrades.

HAMM 1997 [73] führt die deutlich verschiedenen spektralen Hellempfindlichkeitsfunktionen aus ENDERS 1995 [50] nach seinen Recherchen auf die Beteiligung des chromatischen und achromatischen Verarbeitungssystems zurück (vgl. Abschnitt 2.1.2, S. 8). Methoden aus der Gruppe 2 mit dem Hilfskriterium der Wahrnehmungsgeschwindigkeit und Bewegung weisen zwar eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse auf. Sie berücksichtigen jedoch nicht die Beiträge aller Rezeptoren der Netzhaut (vgl. WAGNER & BOYNTON ROBERT M. 1972 [176], VERDON & ADAMS 1987 [170], KOKOSCHKA [99]). Dies gilt insbesondere für die Flimmerphotometrie.

Aus diesem Grund scheiden diese Verfahren aus, wenn alle Rezeptoren berücksichtigt werden sollen. Wenn zudem auch extrafoveale Sehzeichen ($\theta \neq 0^\circ$) untersucht werden sollen, sind Verfahren, die die Sehschärfe nutzen, ebenfalls ungeeignet.

2.2.2 Wahrnehmungsschwellen

Damit beim Auge eine Wahrnehmung erfolgen kann, ist eine minimale Erregung durch einen Reiz nötig. Erst nach Überschreiten einer Schwelle kann ein Lichtreiz wahrgenommen werden (vgl. HARTGE 1990 [74]). Eine Methode, die reale Sehaufgaben möglichst gut nachbildet (vgl. FREIDING 2010 [54]) und zudem der Detektion (vgl. Abschnitt 2.1.5, S. 13) am besten entspricht, ist die *Wahrnehmungsschwelle*. Schwellenmethoden stellen eine Sonderform des heterochromatischen Direktvergleichs dar. Das Vergleichslicht ist das Umfeld, auf dem ein Objekt dargestellt wird (vgl. ENDERS 1995 [50]).

Die Methode der Wahrnehmungsschwelle weist eine höhere Streuung in den Ergebnissen als die Flimmerphotometrie auf (vgl. GERDES 1979 [59]). Zudem ist zu beobachten, dass die Ergebnisse mittels Flimmerphotometrie in der Regel unter den Werten anderer Methoden, z. B. den Schwellenmethoden liegen. ENDERS 1995 [50] beschreibt, dass bei Schwellenuntersuchungen mit $\alpha > 1^\circ$ eine Beteiligung der Stäbchen erfolgt. Im kurzwelligen Bereich führt dies zu höheren Anteilen bei den ermittelten Hellempfindlichkeiten.

Eindeutige Vorteile der Methode der Wahrnehmungsschwelle liegen in der sehr hohen Flexibilität der Parametervariationen (vgl. HAMM 1997 [73]). Die spektrale Zusammensetzung von Objekt und Hintergrund kann ebenso frei gewählt werden wie die Darbietungsdauer, die Objektgröße und der Beobachtungswinkel. Angemerkt sei an dieser Stelle, dass nach FREIDING 2010 [54] die Messung der Reaktionszeiten (vgl. ENDERS 1995 [50]) zu vergleichbaren Ergebnissen wie bei der Methode der Wahrnehmungsschwelle führen.

Fazit:

Die *Methode der Wahrnehmungsschwelle* bildet reale Sehaufgaben am besten ab und entspricht damit vielen Situationen des realen Straßenverkehrs. Aufgrund seiner Relevanz für die vorliegende Arbeit wird auf die Wahrnehmungsschwelle nachfolgend detaillierter eingegangen.

In der Literatur wird zwischen der *Unterschiedsschwelle (Inkrementschwelle)* und der *Absolutschwelle* sowie der *Achromatischen Schwelle* und der *Chromatischen Schwelle* unterschieden.

2.2.2.1 Unterschiedsschwelle (Inkrementschwelle) der Wahrnehmung

Die Strahldichte eines farbigen (quasimonochromatischen) Testlichts wird in einem gleichmäßigen Umfeld aus dem unschwelligem Bereich heraus erhöht. Wird das Testlicht (Objekt) gerade wahrgenommen, so wird die *achromatische (Unterschieds-)Schwelle* erreicht (vgl. HAMM 1997 [73]). Sie legt den erforderlichen Minimalwert fest, damit ein Objekt wahrgenommen werden kann. Form und Farbe können jedoch noch nicht erkannt werden (vgl. FREIDING 2010 [54]).

Dieser gerade wahrnehmbare Leuchtdichteunterschied zwischen Objekt (L_O) und Umfeld (L_U) wird auch als *Eben Merklicher Unterschied (EMU)* und englisch *Just Noticeable Difference (JND)* bezeichnet. Nach Gleichung 2.2 wird für die *achromatische (Unterschieds-)Schwelle* auch der Begriff *Schwellenleuchtdichtedifferenz* ΔL_S verwendet (vgl. GERDES 1979 [59]).

$$\Delta L_S = L_O - L_U \quad \begin{array}{l} \text{Schwellenleuchtdichtedifferenz} \\ \text{= Achromatische (Unterschieds-)Schwelle} \end{array} \quad 2.2$$

mit:

L_O Leuchtdichte des Objektes (Testzeichen)

L_U Leuchtdichte des Hintergrundes (Adaptation)

$$L_O = L_U + \Delta L_S \quad \text{Achromatische Wahrnehmungsschwelle} \quad 2.3$$

mit:

L_O Leuchtdichte des Objektes (Testzeichen)

L_U Leuchtdichte des Hintergrundes (Adaptation)

Die Leuchtdichte des Testzeichens L_0 bezeichnet GERDES nach Gleichung 2.3 als *achromatische Wahrnehmungsschwelle*. FREIDING 2010 [54] hebt hervor: „Die achromatische Schwelle beschreibt somit die erste Wahrnehmung des visuellen Systems, auf die eine aktive Reaktion erfolgen kann.“

Der Quotient aus der gerade erkennbaren Leuchtdichtedifferenz von Objekt und Umfeld nach Gleichung 2.4 wird als *achromatischer Schwellenkontrast* bezeichnet. Er entspricht der Kontrastdefinition nach Weber bezogen auf die Schwelle (vgl. Gleichung 2.1, S. 14).

$$K_{Sa} = \frac{\Delta L_S}{L_U} = \frac{L_O - L_U}{L_U} \quad \text{Achromatischer Schwellenkontrast} \quad 2.4$$

mit:

L_O Leuchtdichte des Objektes (Testzeichen)

L_U Leuchtdichte des Hintergrundes (Adaptation)

Der Kehrwert des achromatischen Schwellenkontrastes nach Gleichung 2.5 wird als *achromatische Unterschiedsempfindlichkeit* definiert (vgl. GERDES 1979 [59]). Wird die Leuchtdichte des Objektes über die achromatische Schwelle hinaus weiter erhöht, so ist die Form des Objektes, meist aber (noch) nicht die Farbe wahrnehmbar (vgl. GERDES 1979 [59]). Wird die Leuchtdichte des Objektes noch etwas erhöht, so wird mit Wahrnehmbarkeit der Farbe des Objektes die *chromatische (Unterschieds-)Schwelle* erreicht. Die Definitionen der Schwellenleuchtdichtedifferenz und des Schwellenkontrastes gelten analog zur achromatischen Schwelle.

$$UE_a = \frac{L_U}{\Delta L_S} = \frac{L_U}{L_O - L_U} \quad \text{Achromatische Unterschiedsempfindlichkeit} \quad 2.5$$

mit:

L_O Leuchtdichte des Objektes (Testzeichen)

L_U Leuchtdichte des Hintergrundes (Adaptation)

2.2.2.2 Absolute Wahrnehmungsschwelle

Wird das Objekt aus Abschnitt 2.2.2.1 auf einem dunklen, lichtlosen Umfeld mit $L_U = 0$ gerade wahrgenommen, so herrschen skotopische Bedingungen vor. Die unter diesen Bedingungen ermittelte achromatische Schwelle wird als *absolute Wahrnehmungsschwelle* bezeichnet (vgl. KINGDOM, FREDERICK A. A. & PRINS 2010 [92]). In diesem Fall gilt $L_0 = \Delta L_S$.

Fazit zu Abschnitt 2.2.2:

Die *achromatische Schwelle* beschreibt die erste Wahrnehmung des visuellen Systems, auf die eine aktive Reaktion erfolgen kann. Sie bildet damit die Grundlage für eine frühestmögliche Reaktion auf kritische Situationen.

2.2.3 Arten der Reizdarbietung

Nach GERDES 1979 [59] werden zwei Arten der Reizdarbietung unterschieden, die er mit Methode 1 und Methode 2 bezeichnet. Verständlicher erscheint es jedoch, die Begriffe „Aufprojektion“ und

„Durchprojektion“ zu verwenden. Abbildung 2.9 zeigt beide Arten der Reizdarbietung grafisch dargestellt.

Aufprojektion

Die in Abschnitt 2.2.2.1 beschriebenen Gleichungen gelten für den Fall der Methode 1 („Aufprojektion“). Das Objekt wird bei dieser Methode *auf* das Umfeld mit homogener Leuchtdichte projiziert. Es entsteht immer ein positiver Kontrast durch ein helles Objekt auf dunklerem Umfeld. Die Leuchtdichte des Objektes setzt sich additiv aus der Leuchtdichte des Umfeldes L_U und derjenigen des für die Wahrnehmung notwendigen Inkrementes ΔL_S zusammen. Diese Methode wird im überwiegenden Teil der Schwellenermittlungen verwendet. Sie bildet die Praxis, beispielsweise in der Automobilbeleuchtung, am besten ab. Ein von Scheinwerfern beleuchtetes Objekt weist immer einen Positivkontrast zum Umfeld auf.

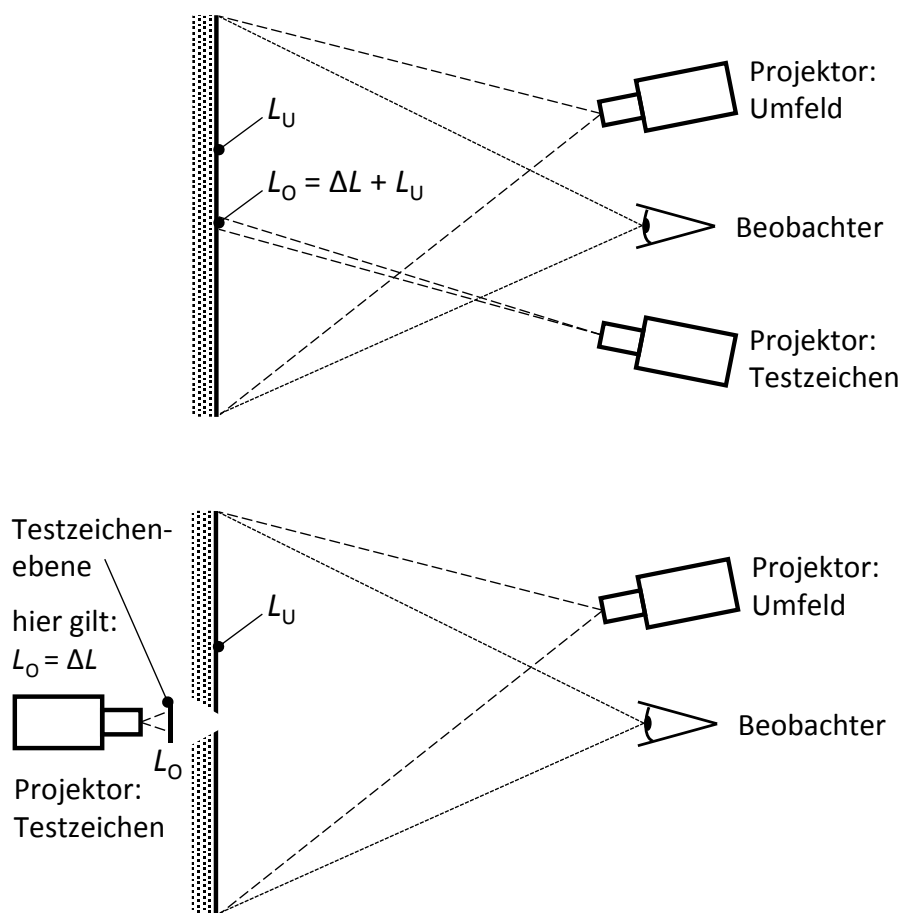


Abbildung 2.9: Arten der Reizdarbietung nach GERDES 1979 [59]

oben: Methode 1 („Aufprojektion“)

unten: Methode 2 („Durchprojektion“)

Durchprojektion

Bei dieser Methode besteht eine Aussparung im Umfeld, die die Größe des Objektes (α) aufweist. Das Objekt wird durch diese Aussparung von der Rückseite des Umfeldes her in Richtung des Beobachters projiziert. An der Stelle der Aussparung ist nur die Objektleuchtdichte vorhanden. Sie entspricht

in diesem Fall dem Inkrement, so dass $L_0 = \Delta L_S$ gilt. Eine Vermischung mit dem Umfeld findet nicht statt. Streng genommen (kein Streulicht, keine Augenbewegung) ist das Auge am Ort des dargebotenen Objektes quasi skotopisch, das heißt völlig dunkel adaptiert. Deshalb wird mit der Durchprojektion eine lokale Absolutschwelle ermittelt. Es können sowohl Positiv-, als auch Negativkontraste erzeugt werden (vgl. ENDERS 1995 [50]), wobei an der ermittelten Schwelle ein Negativkontrast auftritt (vgl. GERDES 1979 [59]).

Fazit:

Die Methode der Aufprojektion bildet Beleuchtungssituationen des Alltags, insbesondere im nächtlichen Straßenverkehr am geeignetsten nach.

2.2.4 Berechnung der spektralen Empfindlichkeit

Eine Testperson hat das auf einem Hintergrund mit der absoluten spektralen Strahldichteverteilung $L_{eU}(\lambda)$ dargestellte quasimonochromatische Objekt der Wellenlänge λ_i mit der absoluten spektralen Strahldichteverteilung $L_{eO}(\lambda)$ in seinem Kontrast als „gerade wahrnehmbar“ bewertet bzw. eingestellt. Somit wurde als Inkrement die achromatische Unterschiedsschwelle $\Delta L_{eS, \lambda_i}(\lambda)$ nach Gleichung 2.2 festgelegt (vgl. auch Abbildung 2.10).

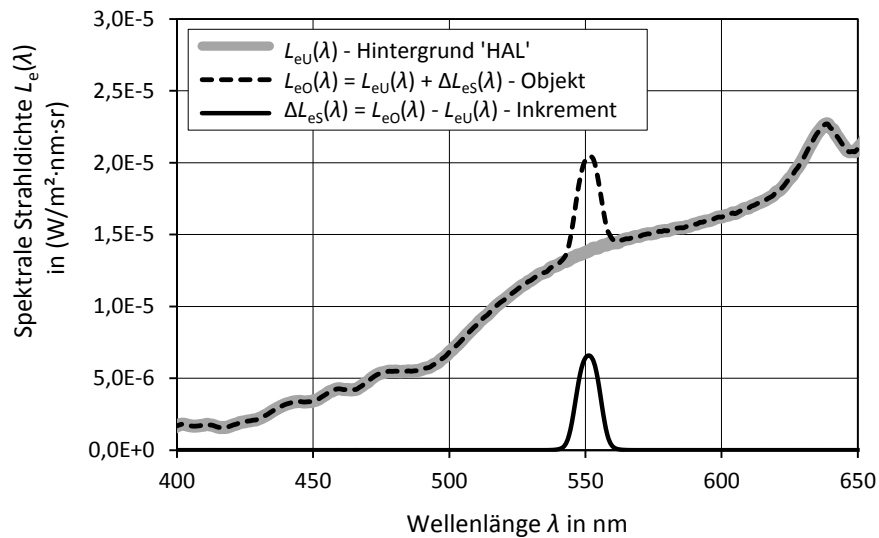


Abbildung 2.10: Absolute spektrale Strahldichteverteilungen: Hintergrund, Objekt, Inkrement

Abbildung 2.10 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Objekt, Umfeld und Inkrement anhand der absoluten spektralen Strahldichteverteilungen an der Schwelle nach den Gleichungen 2.2 und 2.3. Es wird deutlich, dass die Summe aus der spektralen Strahldichteverteilung des Hintergrundes $L_{eU}(\lambda)$ und des Inkrements $\Delta L_{eS}(\lambda)$ das resultierende Gesamtspektrum $L_{eO}(\lambda)$ ergibt.

Zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit bei der Wellenlänge $\lambda_i = 551 \text{ nm}$ wird die absolute Strahldichte $\Delta L_{\text{eS}, \lambda_i}$ am Ende dieses Abgleichvorganges benötigt. Diese kann entweder direkt gemessen oder wie in der vorliegenden Arbeit aus den Kalibrierdaten durch Integration nach Gleichung 2.6 berechnet werden.

$$\Delta L_{\text{eS}, \lambda_i} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Delta L_{\text{eS}}(\lambda) \cdot d\lambda \quad \text{absolute Strahldichte an der Schwelle} \quad 2.6$$

mit:

$\Delta L_{\text{eS}, \lambda_i}$ absolute Strahldichte an der Schwelle für die Wellenlänge λ_i
 $\Delta L_{\text{eS}}(\lambda)$ absolute *spektrale* Strahldichte an der Schwelle für die Wellenlänge λ_i

Die Berechnung der *absoluten spektralen Empfindlichkeit* $v(\lambda_i)$ erfolgt durch das Bilden der Inversen von $\Delta L_{\text{eS}, \lambda_i}$ an der Schwelle für die gewünschte Wellenlänge λ_i .

$$v(\lambda_i) = \frac{1}{\Delta L_{\text{eS}, \lambda_i, \Delta\lambda}} \quad \text{absolute spektrale Empfindlichkeit} \quad 2.7$$

mit:

$v(\lambda_i)$ absolute spektrale Empfindlichkeit für die Wellenlänge λ_i
 $\Delta L_{\text{eS}, \lambda_i, \Delta\lambda}$ absolute Strahldichte an der Schwelle für die Wellenlänge λ_i

Zur Berechnung des *relativen spektralen Empfindlichkeitsgrades* $v_{\text{rel}}(\lambda_i)$ wird die absolute spektrale Empfindlichkeit nach Gleichung 2.7 üblicherweise noch auf die maximale spektrale Empfindlichkeit oder alternativ auf die Wellenlänge $\lambda = 555 \text{ nm}$ normiert (vgl. ENDERS 1995 [50], FREIDING 2010 [54]).

$$v_{\text{rel}}(\lambda_i) = \frac{v(\lambda_i)}{v(\lambda)_{\text{max}}} \quad \text{allg. relativer Empfindlichkeitsgrad} \quad 2.8$$

mit:

$v_{\text{rel}}(\lambda_i)$ relativer Empfindlichkeitsgrad
 $v(\lambda)_{\text{max}}$ maximale spektrale Empfindlichkeit

Nach HARTGE 1990 [74] stellt der allgemeine spektrale Empfindlichkeitsgrad $v_{\text{rel}}(\lambda_i)$ den Faktor dar, mit dem das Auge Strahldichten $L_e(\lambda)$ abhängig von der Wellenlänge λ gewichtet, ehe sie zu einem einheitlichen Kontrasteindruck weiterverarbeitet werden. Bei Ermittlung des spektralen Empfindlichkeitsgrades auf Basis der Methode der Wahrnehmungsschwelle ist nach CIE 41 [26] immer ein Additivitätsfehler zu erwarten (zitiert nach ENDERS 1995 [50]).

2.2.5 Schwankungen in der ermittelten Schwelle

GERDES 1979 [59] weist darauf hin, dass Schwellen naturgemäß keine festen Grenzwerte darstellen. Sie schwanken unter konstanten Versuchsbedingungen zwischen „gerade nicht mehr wahrgenommen“ und „deutlich erkennen“. Diese Schwankungen sind sowohl für ein und dieselbe Versuchsperson (intraindividuell), als auch zwischen verschiedenen Versuchspersonen (interindividuell) zu beobachten. Sie sind von der Versuchsdurchführung her nicht beeinflussbar. Die Art der Änderung der Testzeichenleuchtdichte und die Definition des Begriffes „Wahrnehmen“ haben jedoch einen methodischen Einfluss auf den absoluten Wert der Schwelle. Deshalb erfolgt in Abschnitt 7.2 auf S. 71 eine weiterführende Diskussion zur Methodik der Schwellenermittlung.

2.3 Psychophysik

Die Ermittlung und Schätzung von Schwellen geht bereits auf die Anfänge der Psychophysik zurück. Die Suche nach geeigneten Methoden hat bereits eine ebenso lange Historie (vgl. KLEIN & MACMILLAN 2001 [96]). Der Begriff der Psychophysik geht auf den Physiologen *Gustav Theodor Fechner* und sein 1860 veröffentlichtes Werk *Elemente der Psychophysik* (FECHNER 1860 [52]) zurück. Darin beschreibt Fechner verschiedene quantitative Methoden, die eine genaue Messung von Zusammenhängen zwischen dem Stimulus (Physik) und der subjektiven Wahrnehmung (Psycho...) ermöglichen (vgl. GOLDSTEIN et al. 2008 [62]). Er definiert sie als äußere Psychophysik. Ein Vorteil der Methoden besteht darin, dass sie nichtinvasiv arbeiten (KINGDOM, FREDERICK A. A. 2012 [91]).

Zwei Ziele lassen sich als wesentliche Aufgaben jeder dieser Methoden in der Psychophysik festhalten: einerseits das sinnvolle Verteilen und Platzieren der Reizintensitäten um den interessierenden Bereich; andererseits das sinnvolle Schätzen von relevanten Parametern wie der Schwelle aus der erhaltenen Datenmenge (vgl. LEVITT 1971 [112]).

FECHNER beschreibt in seinem Werk *drei klassische Methoden*, mit denen die (Unterschieds-)Schwelle indirekt ermittelt werden kann. Diese werden nachfolgend kurz erläutert. Zu beachten ist dabei, dass die resultierende Schwelle je nach Methode variiert und unterschiedlich hoch ausfallen kann (vgl. GREEN et al. 2008 [66], siehe auch Abschnitt 2.2.5).

2.3.1 Grenz(wert)methode

Die *Grenzwertmethode* wird englisch auch *Method of Limits* genannt und von FECHNER als *Methode der eben merklichen Unterschiede* bezeichnet. Dabei verändert der Versuchsleiter die Reizintensität in definierten aber festen Schrittweiten. Von einem deutlich über- oder unterschwelligen Reiz wird die Intensität so lange verändert, bis die Testperson den Reiz nicht mehr bzw. gerade wahrnimmt. Die Schwelle kann als Mittelwert aus den letzten beiden Intensitätsstufen geschätzt werden (vgl. LEVITT 1971 [112]). Messreihen mit aufsteigenden und absteigenden Reizintensitäten wechseln sich ab, bis jeweils ein Umkehrpunkt erreicht ist. Die Schritte dürfen dabei nicht zu groß gewählt werden, da die Schwelle sonst nur unpräzise ermittelt werden kann.

Ein Nachteil der Methode besteht darin, dass Testpersonen dabei die Neigung aufweisen, bei absteigenden Reizintensitäten die Wahrnehmung des Reizes weiter zu berichten, obwohl der Reiz nicht

mehr wahrnehmbar ist (*Habituationsfehler*). Bei aufsteigenden Reizintensitäten ist das Verhalten umgekehrt. Zudem treten *Erwartungseffekte* auf, so dass nach einer gewissen Anzahl von wahrgenommenen Reizen eine Nicht-Wahrnehmung erwartet wird und umgekehrt (vgl. ZWISLER 1998 [185]). Neben dem ermittelten Wert für die Schwelle kann auch eine psychometrische Funktion anhand der Daten beschrieben werden (vgl. Abschnitt 2.3.4).

2.3.2 Einstell-/Herstellmethode

Die *Einstellmethode* nennt FECHNER *Methode der mittleren Fehler*. Hierbei stellt die Testperson die Reizintensität stufenlos selbst ein, bis der Reiz wahrnehmbar oder ein Vergleichsreiz abgeglichen ist. Durch das Ändern der Einstellrichtung bei Erreichen der Schwelle können Habituationsfehler und Erwartungseffekte reduziert werden (vgl. ZWISLER 1998 [185]). Das Ergebnis der Einstellmethode ist ein einzelner Kontrastschwellenwert und keine psychometrische Funktion. Der Schwellenwert liegt im Vergleich zu den anderen Methoden sehr hoch (vgl. GREEN et al. 2008 [66]). Sie ist die schnellste, jedoch auch die ungenaueste Methode. Aus der Einstellmethode ist später *Beckes's Tracking-Methode* entstanden. Statt den Reiz manuell zu verändern, geschieht dies hier automatisch, solange die Testperson einen Knopf drückt. Bei Loslassen des Knopfes erfolgt ein Richtungswechsel.

2.3.3 Konstanzmethode

Die *Methode der konstanten Reize* (engl. *Method of Constant Stimuli*) heißt bei FECHNER *Methode der richtigen und falschen Fälle*. Sie stellt eine Verbesserung der Grenzwertmethode dar. Die Reizintensitäten werden aus einer vorab festgelegten Auswahl zufällig nacheinander dargeboten. Habituationsfehler und Erwartungseffekte treten nicht auf (vgl. ZWISLER 1998 [185]). Die Methode ist sehr genau, aber dafür auch sehr zeitintensiv. Wird jede in zufälliger Reihenfolge dargebotene Reizintensität n -fach wiederholt, so kann wie bei der Grenzwertmethode je Intensität direkt der Anteil der (korrekten) „Ja-Antworten“ (Objekt wahrgenommen) als Wahrscheinlichkeit berechnet werden. Aus diesen Informationen kann direkt die psychometrische Funktion (vgl. Abschnitt 2.3.4) bestimmt werden.

2.3.4 Psychometrische Funktion

Bei dem Konzept der Schwelle wird nicht von einer festen Grenze ausgegangen (vgl. Abschnitt 2.2.5, S. 24), sondern davon, dass Intensitäten an der Schwelle manchmal entdeckt werden und manchmal nicht. Die Wahrnehmungsschwelle einer Person muss deshalb statistisch aus einer gewissen Anzahl von Wiederholungen definiert werden (vgl. ZWISLER 1998 [185]). Die *psychometrische Funktion (PF)* dient diesem Zweck und liefert die grundlegenden Daten der Psychophysik. Dazu wird auf der Abszisse die Stärke eines Reizes und auf der Ordinate die Antwort des Probanden aufgetragen (vgl. KLEIN 2001 [95]).

Abbildung 2.11 zeigt exemplarisch ein visuelles Kontrastexperiment und die daraus resultierende psychometrische Funktion. Auf der x-Achse ist im vorliegenden Fall der Kontrast aufgetragen. Die PF wird so angepasst („gefitted“), dass sie die experimentell aufgenommenen Datenpunkte am besten

repräsentiert. Als Kontrast-/Detektionsschwelle wird üblicherweise diejenige Reizintensität definiert, die einer Wahrscheinlichkeit von 50 % entspricht (vgl. KLEIN 2001 [95], GOLDSTEIN et al. 2008 [62], FRIEDBURG et al. 1998 [56], CIE 95 [30]). Der entsprechende x-Wert wird über den Wendepunkt der PF berechnet. In vielen praktischen Anwendungen ist aber durchaus auch die Wahl derjenigen Intensität sinnvoll, die 99 % der wahrgenommenen Reize entspricht (vgl. GREEN et al. 2008 [66]).

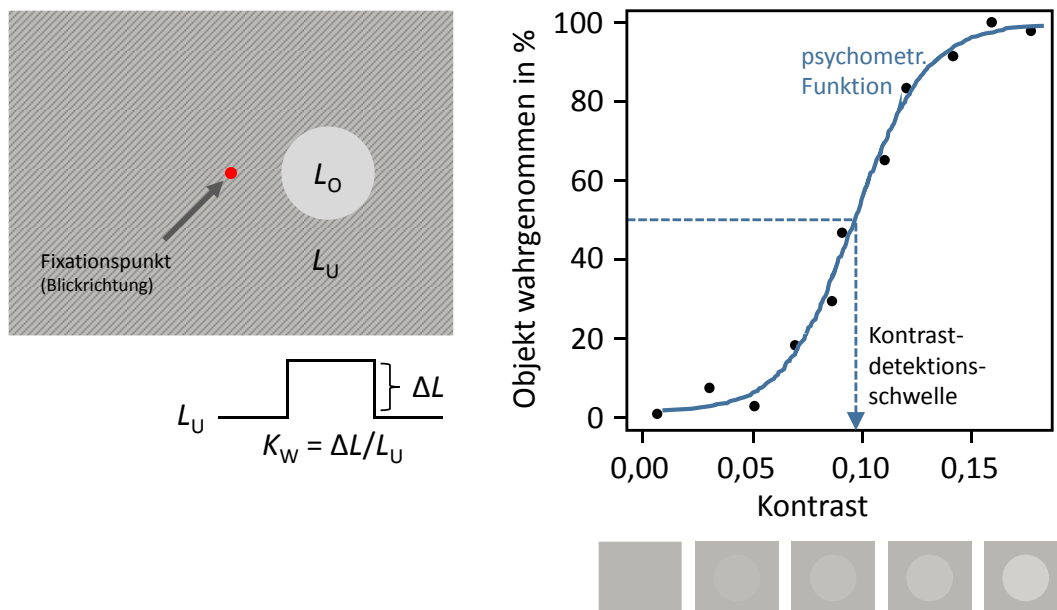


Abbildung 2.11: Visuelles Kontrastexperiment und resultierende psychometrische Funktion angepasst nach KINGDOM, FREDERICK A. A. & PRINS 2010 [92]

BLACKWELL 1953 [10] erhält in seinen Untersuchungen zur Anpassung an die Rohdaten u.a. mit der Summenfunktionen der Normalverteilung und der log-Normalverteilung („log normal ogives“ and „normal ogives“) gute Ergebnisse. Insgesamt stehen für eine Anpassung heute zahlreiche *Sigmoid-funktionen* (*S-Funktionen*) zur Verfügung. STRASBURGER 2001 [164] nennt hier neben anderen Alternativen die *logistische Funktion* als eine der am häufigsten verwendeten Fit-Funktionen. Gleichung 2.9 zeigt die Formel für die logistische Funktion nach LINSCHOTEN et al. 2001 [114].

$$P(x) = \gamma + (1 - \gamma) \cdot \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{x}{\alpha_r} \right)^{-\beta}} \right) \quad \text{Logistische Funktion} \quad 2.9$$

mit:

- $P(x)$ Anteil/Wahrscheinlichkeit für "Objekt wahrgenommen" (korrekte Antworten)
- γ Ratewahrscheinlichkeit (Offset)
- α_r Reizintensität an der Schwelle (Wendepunkt)
- β Steigung der Funktion

Nimmt die Anzahl der dargebotenen Wiederholungen n einer Reizintensität ab, so nimmt die PF immer mehr eine irreguläre Form an. Die Steigung der Funktion β verliert an Aussagekraft, da sie hohen Schwankungen unterworfen ist (vgl. WETHERILL 1963 [181], LEVITT 1971 [112]). In umfangreichen Simulationen erhalten LINSCHOTEN et al. 2001 [114] die besten Anpassungen, wenn die Faktoren β und γ konstant gehalten werden. Dies gilt auch für den Sonderfall, dass jede Reizintensität nur 1 x dargeboten wird. In diesem Fall können beide Faktoren in Voruntersuchungen näher bestimmt werden. Für den Fall einer Ja-/Nein-Methodik zur Abfrage der Wahrnehmung eines Reizes nähert sich der untere Ast der PF dem Wert 0 an ($\gamma = 0$).

2.3.5 Adaptive Prozeduren

Die klassischen psychophysikalischen Methoden (vgl. Abschnitte 2.3.1-2.3.3) weisen den Nachteil auf, dass sie je nach Auslegung einen erheblichen Anteil der benötigten Zeit mit Reizintensitäten fern der Schwelle verschwenden. Adaptive Methoden – auch als *Staircase-Methoden* bezeichnet – sind zur Schätzung einer PF erst seit der Verfügbarkeit von ausreichend leistungsstarken Computern nutzbar. Sie variieren die Reizintensität durch einen Algorithmus in Abhängigkeit der vorangegangenen Antwort der Testperson und werden oft anstelle der Konstanzmethode eingesetzt. Sie nähern sich sehr schnell der vermuteten Schwelle und nutzen damit das Maximum an Informationen aus jeder Reizdarbietung aus (vgl. KINGDOM, FREDERICK A. A. 2012 [91]). Ein Großteil der dargebotenen Reizintensitäten befindet sich deshalb sehr dicht an der Schwelle. Die benötigte Zeit für eine Schwellenbestimmung kann auf diese Weise stark verkürzt werden.

Auf eine ausführliche Beschreibung der adaptiven Verfahren wird an dieser Stelle verzichtet. KINGDOM, FREDERICK A. A. & PRINS 2010 [92] geben in Kapitel 5 einen guten Überblick. Eine genauere Beschreibung des in der vorliegenden Arbeit genutzten adaptiven Verfahrens ist in Abschnitt 7.2.1 (S. 71) zu finden. Die verwendeten Parameter fasst Tabelle 7.6 (S. 75) zusammen.

2.3.6 Forced-Choice-Methoden

Die beschriebene Grenzwertmethode und die Konstanzmethode nutzen beide eine Ja-/Nein-Methodik, um von der Testperson zu erfahren, ob ein Objekt wahrgenommen wurde. Ein möglicher Nachteil dieser Methodik ist, dass die Testpersonen zu einer der beiden Antworten tendieren. Sie können damit alleine durch ihr Antwortverhalten die Schwelle in eine Richtung verschieben, obwohl die Schwelle aus sensorischer Sicht gleich geblieben ist. Dieses Verhalten wird auch als *Antwort-Bias* bezeichnet (vgl. GREEN et al. 2008 [66]).

Um diese Tendenz zum Antworten nicht mit zu berücksichtigen, wurden die *Forced-Choice-Methoden* entwickelt. Anstelle einer Ja-/Nein-Antwort muss sich die Testperson aus mehreren Alternativen entscheiden:

- **Räumliche Forced-Choice-Methode:**

Das Objekt kann an mehreren unterschiedlichen Orten auftauchen und die Testperson muss berichten, an welcher der möglichen Orte dies der Fall ist. Bei zwei möglichen Orten wird dies als *two-alternative-forced-choice (2AFC)* bezeichnet.

- **Zeitliche Forced-Choice-Methode:**

Das Objekt kann in einem der zeitlich hintereinander folgenden Intervalle auftauchen. In diesem Fall taucht das Objekt in der Regel räumlich gesehen an derselben Stelle auf, jedoch zeitlich versetzt. Doch auch in diesem Fall muss sich die Testperson entscheiden, in welchem der Intervalle das Objekt vorhanden war. Bei zwei zeitlich voneinander getrennten Intervallen wird diese Methode als *two-interval-forced-choice (2IFC)* bezeichnet.

Trotz der Vermeidung eines Antwort-Bias können forced-choice-Methoden in der Praxis auch Nachteile aufweisen. Die Wahl des entsprechenden Verfahrens für die vorliegende Arbeit wird in Abschnitt 7.2.5 (S. 74) näher beschrieben und begründet.

Fazit zu Abschnitt 2.3:

Die Psychophysik bietet zahlreiche Methoden zur Ermittlung einer Schwelle. Zur Schätzung bzw. Berechnung von Schwellen bietet die Ermittlung psychometrischer Funktionen den größten Informationsgehalt. Die klassischen Methoden haben heute in vielen Bereichen aufgrund ihrer diskutierten Nachteile an Bedeutung verloren. Zudem weisen adaptive Prozeduren zeitliche Vorteile auf. Forced-choice-Methoden vermeiden unerwünschte Einflüsse durch die Neigung von Probanden zu einem bestimmten Antwortverhalten. Dennoch weisen sie auch Schwächen auf, die ihre Anwendung nicht immer zur ersten Wahl werden lässt.

3 Bisherige Ergebnisse in der Literatur

In Kapitel 2 wurden die Grundlagen zum Aufbau des visuellen Systems sowie die Herausforderungen der Wahrnehmung im mesopischen Bereich des Sehens beschrieben. Zur Charakterisierung zeitkritischer visueller Vorgänge in Bezug auf das Verkehrsgeschehen erweist sich die Methode der achromatischen Wahrnehmungsschwelle als besonders geeignet. Im Folgenden wird auf Basis dieser Erkenntnisse ein kurzer Überblick zu bereits durchgeführten Untersuchungen anhand der *Schwellenmethode* gegeben und in den Kontext der vorliegenden Arbeit eingegliedert.

Untersuchungen zur Kontrastschwelle polychromatischer Objekte lassen sich bereits auf die Anfänge der Wahrnehmungsforschung zurückführen. Die Anfänge zur Untersuchung der spektralen Abhängigkeit anhand von Schwellenuntersuchungen gehen auf die ersten Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts zurück. Bereits STILES & CRAWFORD 1933 [162] führten mit 2 Testpersonen (sich selbst) Schwellenuntersuchungen in Abhängigkeit von der Wellenlänge durch. Sie variierten unter monokularer Sicht für $\alpha = 0,7^\circ \times 0,16^\circ$ und $\theta = 0^\circ$ und 5° die Adaptationsleuchte L_U auf Basis der Durchprojektion (Absolutschwelle), sogar in Kombination mit einer Blendquelle. Allerdings verwendeten sie eine künstliche Pupille von 2-3 mm Durchmesser. Sie fanden drei typische Maxima für $\lambda = 440$ nm, 550 nm und etwa 610 nm. Über die exakte Beschaffenheit des Adaptationsspektrums sind keine Informationen zu finden. In weiteren Untersuchungen bestätigt STILES die gefundenen Ergebnisse zum chromatischen Verhalten (vgl. STILES 1939 [159], STILES 1946 [160], STILES 1949 [161]).

KING-SMITH & CARDEN 1976 [93] führten Untersuchungen der Schwelle im Vergleich zur Flimmermethode (vgl. Abschnitt 2.2.1, S. 18) durch ($\alpha = 1^\circ$; $t_d = 200$ ms; $\theta = 0^\circ$; CCT = 3200 K; $L_U = 162$ cd/m²). Sie bestätigen ein Einzelmaximum bei $\lambda = 555$ nm mit der Flimmermethode. Anhand der Schwellenmethode erhalten sie drei Maxima für $\lambda = 440$ nm, 530 nm und etwa 600 nm und bestätigen damit die farboponenten Systeme.

KRANDA & KING-SMITH 1979 [102] nutzen ein Maxwellian-View-Systems (vgl. CAMPBELL & SIMONET 1990 [23], WESTHEIMER 1959 [180]) unter den Bedingungen $\alpha = 1^\circ$; $t_d = 500$ ms; $L_U = 162$ cd/m² für eine Testperson. Den Hintergrund bezeichnen sie als „weiß“ ohne weitere Angaben zu machen. Auch sie erbringen den Nachweis für ein achromatisches und ein Gegenfarbensystem.

MOORHEAD & SAUNDERS 1982 [125] führten für 2 Testpersonen und monokulare Sicht Schwellenuntersuchungen für die Sehwinkel $\alpha = 1^\circ$ und 2° bei einer Pulsdauer des Lichtreizes von $t_d = 500$ ms durch. Sie nutzen ein Umfeld mit $L_U = 191$ cd/m² und der ähnlichsten Farbtemperatur CCT = 4500 K bei einem Beobachtungswinkel von $\theta = 0^\circ$. Auch bei dieser Untersuchung wurde wie bei STILES & CRAWFORD 1933 [162] der Pupillendurchmesser durch ein Maxwellian-View-System (Projektion) auf 2 mm begrenzt. Sie fanden für $\alpha = 2^\circ$ ebenfalls typische Maxima für $\lambda = 440$ nm, 540 nm und etwa 600 nm. Bei $\alpha = 1^\circ$ erhielten Sie einen $V(\lambda)$ -ähnlichen Verlauf mit einem zusätzlichen Peak im kurzwelligen Bereich und schlossen auf die ausschließliche Beteiligung des achromatischen Kanals bei $V(\lambda)$. Für die Aufgabe der Diskrimination, die zusätzlich durchgeführt wurde, war der Peak um $\lambda = 440$ nm deutlich schwächer.

In den folgenden Jahren folgen zahlreiche weitere Untersuchungen, die im Wesentlichen den Einfluss der Pulsdauer t_d , der Adaptationsleuchtdichte L_U , und des Beobachtungswinkels θ untersuchten. Für eine weiterführende Auflistung wird auf FREIDING 2010 [54] verwiesen. Als Versuch einer Modellierung der visuellen Wahrnehmung im mesopischen Bereich hat die CIE zwei Vorschläge veröffentlicht

(vgl. Abschnitt 2.1.6.2, S. 16; CIE 191:2010 [33]), auf die in Abschnitt 10.7 (S. 114) näher eingegangen wird.

Im Kontext der vorliegenden Arbeit lassen sich die Eigenschaften aller Untersuchungen in Bezug auf eine vergleichende Auswertung mit folgenden Schwächen zusammenfassen:

- Die Untersuchungsbedingungen sind sehr heterogen und zwischen den verschiedenen Arbeiten selten vergleichbar. In der Regel fehlt für eine Vergleichbarkeit der Arbeiten eine vollständige Angabe aller wichtigen Parameter (z. B. α , θ , t_d , L_U).
- Angaben zu den Beobachtungsbedingungen monokular/binokular fehlen.
- Trotz der Nutzung der Schwellenmethode sind die Bedingungen nicht praxisgerecht, wenn beispielsweise eine künstliche Pupille bzw. ein Maxwellian-View-System verwendet wird.
- Aus den Untersuchungen geht nicht immer hervor, ob die Form der Auf- oder Durchprojektion zur Reizdarbietung gewählt wurde.
- Die Adaptationsleuchtdichte L_U ist überwiegend im photopischen Bereich gewählt. Auf Basis der Erkenntnisse ist eine Übertragbarkeit auf den mesopischen Bereich nicht gegeben.
- Nicht selten untersuchen sich die Autoren selbst. Neben dem Nachteil eines „informierten Beobachters“ fällt die Anzahl der Versuchspersonen häufig gering aus (1 - 7 Teilnehmer).

Als *Hauptkritikpunkt* im Kontext der vorliegenden Arbeit lassen sich folgende Aspekte festhalten:

- Die Angaben zur *spektralen* Zusammensetzung des Hintergrundes L_U sind in der Regel nicht ausreichend. Im Optimalfall ist eine ähnlichste Farbtemperatur CCT oder ein Farbart $U(x; y)$ angegeben. Oft ist jedoch nur eine Lampenart, wie beispielsweise „Halogenleuchte“ angegeben. Nicht selten ist nur die Angabe „weißer“ Hintergrund zu finden.

Eine Untersuchung, die den Einfluss der spektralen Zusammensetzung des Adaptationshintergrundes in Ansätzen untersucht, ist HAMM 1997 [73]. Allerdings verwendet der Autor die Methode der Durchprojektion und eine Adaptationsleuchtdichte im photopischen Bereich mit $L_U = 100 \text{ cd/m}^2$ sowie $\theta = 0^\circ$. Als Lichtquelle kommt eine Lampe mit dem typischen spektralen Verlauf einer Glühlampe mit CCT = 3800 K und einem Farbart $U(x; y) = (0,38; 0,42)$ zum Einsatz. Zudem wird eine Entladungslampe mit CCT = 4560 K und einem Farbart $U(x; y) = (0,35; 0,36)$ verwendet. Unter den Bedingungen $\alpha = 1^\circ$ und $\theta = 0^\circ$ stellt der Autor bei 5 untersuchten Personen einen Einfluss des Adaptationsspektrums auf die spektrale Hellempfindung im kurzwelligen Bereich fest. Eine statistische Signifikanzanalyse erfolgt nicht. Zudem ist eine Übertragung der Ergebnisse auf mesopische Adaptationsbedingungen nicht möglich (vgl. Abschnitt 10.6.1, S. 111).

Aktuellere Untersuchungen anhand der Schwellenmethode im mesopischen Bereich fasst Tabelle 3.1 zusammen. Bis auf die Untersuchung von KURTENBACH et al. 1999 [105] stehen alle Untersuchungen im weiteren Zusammenhang mit dem MOVE-Projekt (vgl. ELOHOLMA & HALONEN 2005 [49]). KURTENBACH et al. verwenden ein Maxwellian-View-System für ihre Untersuchungen. Die Netzhautbeleuchtungsstärken in Troland (td) als Angabe für die Adaptation wurden in cd/m^2 umgerechnet. Diese Werte gelten jedoch nur näherungsweise. Das Versuchsssetup unterscheidet sich von dem der Schwellenuntersuchung mit Aufprojektion, so dass eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse schwierig ist.

Die Untersuchung von ORREVETELÄINEN 2005 [128] weist die Besonderheit auf, dass die zu detektierenden Objekte nicht durch einen Projektor mit Filter, sondern direkt durch LEDs mit hoher Halbwertsbreite ($\lambda_{HWB} > 15 \text{ nm}$) erzeugt wurden. Sie decken zudem nur einen begrenzten Spektralbereich ab. Die Untersuchung von VARADY et al. 2007 [168] beruht auf Schwellenmessungen. Allerdings wurde hier als Kriterium nicht die achromatische Schwelle, sondern die Diskrimination anhand eines Landolt-Ringes verwendet.

Tabelle 3.1: Übersicht ausgewählter Schwellenuntersuchungen im mesopischen Bereich

	HAFERKEM- PER et al. 2007 [71]	FREIDING et al. 2007 [55]	FREIDING 2010 [54], FREIDING et al. 2007 [55]	KURTENBACH et al. 1999 [105]	ORREVETE- LÄINEN 2005 [128]	VARADY et al. 2007 [168]	VAS & BODROGI 2007 [169]
Schwelle	Inkrement	Inkrement	absolut	Inkrement	absolut	Inkrement	Inkrement
Adaptation L_u in cd/m^2	0,1 / 0,5	0,01 / 0,1 / 1	0,01 / 0,1 / 1 / 10	0,47 / 1,49 / 4,7 / 14,98 $\text{td}^{1)}$	0,1 / 1 / 10	0,1 / 1 / 10	0,5
Pulsdauer t_d in s	2	3	0,01 / 0,1 / 3	2	0,5	3	2
Sehwinkel α in $^\circ$	2	2	2	2	0,29	2 ³⁾	2
Sehbedingung	-	binokular	monokular rechts	Maxwellian View	binokular	binokular	-
Beobachtungswinkel θ in $^\circ$	30	0 / 10	0 / 10	5	0 / 10 / 30 / 60	0 / 10	20
CCT in K oder Farbort in (x; y)	(0,42; 0,40) ⁴⁾	3200	2856	6000	4820 - 5020	3200	(0,39; 0,35) (0,41; 0,41)
λ in nm	420 - 660	420 - 700	400 - 740	420 - 680	470 - 639 ²⁾	420 - 700	410 - 670
Testpersonen	14	10	5	3	13	10	1
Spektraldaten	relativ	relativ	relativ	relativ	relativ	relativ	relativ
Daten tabellarisch verfügbar	nein	nein	(ja)	nein	ja	nein	nein

¹⁾ Umrechnung von td in cd/m^2 : unter Annahme eines Pupillendurchmessers von 2,5 mm: $0,01/0,30/0,96/3,1 \text{ cd/m}^2$

²⁾ es wurden 5 LEDs als Objekte verwendet

³⁾ Diskrimination anhand eines Landolt Ringes

⁴⁾ hier werden lediglich die Lichtquellen Halogenlampe und LED angegeben

Die Übersicht in Tabelle 3.1 offenbart in Bezug auf eine Vergleichbarkeit der Untersuchungen drei wesentliche Schwächen. Erstens ist die Wahl der Versuchsparameter nicht einheitlich bzw. nicht immer vollständig dokumentiert. Zweitens wurden viele Untersuchungsergebnisse nicht in tabellarischer Form publiziert, so dass die Daten zu Vergleichszwecken hätten herangezogen werden können. Ein dritter Schwachpunkt der Untersuchungen ist, dass sie fast ausschließlich mit relativen, das heißt normierten Empfindlichkeiten arbeiten. Auf diese Weise geht ein Großteil des Informationsgehaltes verloren. Der Vergleich absoluter interindividueller Unterschiede oder das Festlegen von Absolutschwellen als Sicherheitskriterium ist auf diese Weise nicht mehr möglich.

Fazit zu Kapitel 3:

Fasst man die vorgestellten Untersuchungen zusammen, kann festgehalten werden, dass in den vergangenen Jahrzehnten zahlreiche Untersuchungen anhand der Schwellenmethode durchgeführt wurden – der Großteil jedoch im *photopischen* Bereich. Sie sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Anwendung im mesopischen Bereich nicht verwendbar (vgl. auch Abschnitt 10.6.1, S. 111).

Betrachtet man Tabelle 3.1, so wird deutlich, dass selbst bei den Schwellenuntersuchungen im mesopischen Bereich eine Vielfalt an unterschiedlichen Untersuchungsbedingungen vorliegt. Aus den Artikeln der Autoren gehen nicht immer alle für einen Vergleich der Untersuchungen benötigten Informationen hervor. Die Sehbedingungen variieren drastisch, wenn ein Maxwellian-View-System verwendet wird, da durch eine Projektion des Bildes in das Beobachteraue die Funktion der Pupille ausgeschaltet wird. Auch bei den Angaben zum Adaptationsspektrum sind große Unterschiede vorhanden. Gemeinsam ist allen Untersuchungen, dass Informationen zum exakten spektralen Verlauf des Adaptationsspektrums fehlen.

Zu den Untersuchungen, die die Wahrnehmungsschwelle als Inkrement im mesopischen Bereich verwenden, zählen im engeren Sinn lediglich die von HAFERKEMPER et al. 2007 [71], FREIDING et al. 2007 [55] und VAS & BODROGI 2007 [169]. Der Einfluss des Adaptationsspektrums wird jedoch auch hier in keiner der Arbeiten untersucht. In diesem Kontext ist lediglich die Arbeit von HAMM 1997 [73] zu nennen, der jedoch eine Absolutschwelle unter photopischen Bedingungen und einen Beobachtungswinkel von $\theta = 0^\circ$ verwendet.

4 Aufgabenstellung und Ziele der Arbeit

Aus Kapitel 1 wird deutlich, dass gute Sichtbedingungen durch eine optimierte Ausleuchtung des Verkehrsraumes im Fahrzeugvorfeld eine wichtige Voraussetzung zur Minimierung von Verkehrsunfällen bei Nacht sind. Im Bereich der Frontbeleuchtungssysteme haben sich in den vergangenen Jahren zwei dynamische Entwicklungstendenzen ergeben. Einerseits stehen neben Halogenglühlampen und Xenon-Entladungslampen mittlerweile auch LEDs als Lichtquelle zur Verfügung. Alle drei Lichtquellen weisen dabei gänzlich unterschiedliche spektrale Lichtverteilungen auf. Andererseits ermöglichen die neuen lichttechnischen Fahrerassistenzsysteme die flexible Veränderung der räumlichen Lichtverteilung in immer feinerer Auflösung. Kombiniert man beide Entwicklungen, so ergeben sich bislang nicht realisierbare Möglichkeiten, die eine unterschiedliche spektrale Zusammensetzung der Ausleuchtung vor dem Fahrzeug in Abhängigkeit vom Winkel zulassen.

In Kapitel 2 wurde gezeigt, dass die visuelle Wahrnehmung im mesopischen Bereich eine besondere Dynamik aufweist und ständigen Anpassungsprozessen an verschiedene Einflussparameter unterliegt. Alle Rezeptoren der Netzhaut – die Stäbchen sowie die drei Zapfenarten – sind daran beteiligt (vgl. Abschnitt 2.1.3, S. 10). Betrachtet man das reale Verkehrsgeschehen, so entspricht die *Detektion* auf Basis vorhandener Kontrastunterschiede der *ersten Wahrnehmung*. Diese Wahrnehmung bildet damit den frühestmöglichen Zeitpunkt, um eine Reaktion auf eine kritische Situation einzuleiten (vgl. Abschnitte 2.1.4, S. 12 und 2.1.5, S. 13). Es wurde ein Überblick über die zahlreichen alternativen Methoden zur Ermittlung der spektralen Empfindlichkeit gegeben. Dabei wurden die wesentlichen Vor- und Nachteile der Methoden diskutiert (vgl. Abschnitt 2.2.1, S. 18). *Schwellenmethoden* bieten die beste Synergie aus der Berücksichtigung aller Rezeptoren der Netzhaut und einer hohen Flexibilität bei der kontrollierten Variation wichtiger wahrnehmungsrelevanter Einflussparameter (vgl. Abschnitte 2.1.6.2, S. 16 und 2.2.2, S. 18). Die *Methode der achromatischen Schwelle* (vgl. Abschnitt 2.2.2.1, S. 19) hat sich für die Ermittlung der Detektion bzw. der ersten Wahrnehmung als besonders geeignet herausgestellt. Dabei stimmt eine Reizdarbietung durch „*Aufprojektion*“ als *Inkrement* am besten mit realen Sehaufgaben überein (vgl. Abschnitt 2.2.3, S. 20).

Eine Betrachtung der Literatur in diesem Kontext zeigt in Kapitel 3, dass in den vergangenen Jahrzehnten zahlreiche Untersuchungen anhand der Schwellenmethode durchgeführt wurden. Grenzt man die Untersuchungen allerdings auf den für das nächtliche Verkehrsgeschehen relevanten mesopischen Bereich ein, so ergeben sich im Wesentlichen nur noch die in Tabelle 3.1 dargestellten Untersuchungen. Bei einer weiteren Eingrenzung der Untersuchungen auf die Methode der achromatischen Inkrementenschwelle bleiben lediglich drei Untersuchungen übrig. Aufgrund der unterschiedlichen Untersuchungsbedingungen (Beobachtungswinkel, Adaptationsleuchtdichte) sind diese Studien jedoch nicht vergleichbar. Zudem werden überwiegend nur relative normierte Empfindlichkeitsfunktionen verglichen. Daraus leitet sich die Forderung für zukünftige Untersuchungen generell und die vorliegende Arbeit im Speziellen ab, dass diese mit einem identischen Versuchsaufbau, gleicher Variation der Parameter, identischen Versuchspersonen und absoluten Spektraldaten durchgeführt werden müssen. Nur so kann eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sichergestellt werden.

Die wesentlichen Einflussgrößen auf die Wahrnehmung im mesopischen Bereich sind bekannt und wurden in vielen Untersuchungen überprüft und bestätigt (vgl. Abschnitt 2.1.6.2, S. 16). Als wesentliches Merkmal aller gefundenen Untersuchungen lässt sich im Kontext der vorliegenden Arbeit fest-

halten: eine systematische Untersuchung des Einflusses des Adaptationsspektrums auf die Wahrnehmungsschwelle eines Objektes unter kontrollierter Variation anderer Einflussgrößen hat bislang nicht stattgefunden. Lediglich eine Untersuchung hat sich mit dieser Fragestellung beschäftigt. Dies wurde jedoch nur als Zusatz zur Validierung der Ergebnisse durchgeführt. Eine statistische Signifikanzprüfung erfolgt dabei nicht (vgl. Kapitel 3).

Auf der Basis dieser Erkenntnisse ergibt sich für die vorliegende Arbeit die grundlegende Fragestellung: „Inwieweit hat das Adaptationsspektrum – die spektrale Zusammensetzung des beleuchteten Umfeldes – einen Einfluss auf die Detektierbarkeit und damit auf die spektrale Empfindlichkeit an der Wahrnehmungsschwelle eines beleuchteten Objektes?“

Dabei werden folgende Einflussgrößen berücksichtigt und variiert:

- die spektrale Zusammensetzung der Adaptationsbeleuchtung sowie deren Niveau (Leuchtdichte),
- die spektrale Zusammensetzung des zu detektierenden Objektes und
- die Lage des Objektes im Gesichtsfeld (Beobachtungswinkel θ).

Um diese Fragestellung systematisch zu untersuchen, ist die Arbeit in vier wesentliche Teile gegliedert:

1. *Aufbau eines Versuchsstandes, der die Fragestellung unter kontrollierter Variation der aufgeführten Einflussgrößen ermöglicht (vgl. auch Abschnitt 2.1.6.2):*

Kapitel 5 beschreibt den im Rahmen der Arbeit entstandenen Aufbau sowie seine wesentlichen Komponenten. **Kapitel 6** geht auf die durchgeführten Maßnahmen zur Kalibrierung des Versuchsstandes und damit die Sicherstellung korrekter Messergebnisse näher ein.

2. *Festlegung der Parameterwerte der Einflussgrößen, die sich möglichst eng am realen Verkehrsgeschehen orientieren:*

Kapitel 7 erläutert in diesem Zusammenhang die Auswahl der für die durchgeführten Untersuchungen verwendeten Parameterwerte. Zudem wird auf die verwendete Untersuchungsmethodik und den Versuchsablauf eingegangen.

3. *Durchführung der Untersuchungen und deren Analyse:*

Nach der Durchführung der Untersuchungen ist eine Aufbereitung der Rohdaten sowie eine statistische Analyse erforderlich. **Kapitel 8** zeigt die wesentlichen Grundlagen für eine geeignete Analyse der Daten auf. **Kapitel 9** stellt die aus der Analyse hervorgegangenen Ergebnisse vor.

4. *Diskussion der Ergebnisse und Vergleich mit der Literatur:*

Die in Kapitel 9 vorgestellten Ergebnisse werden in **Kapitel 10** anhand folgender Teilfragen diskutiert und dabei mit der recherchierten Literatur verglichen:

- Hat das Adaptationsspektrum einen Einfluss auf die spektrale Empfindlichkeit an der Wahrnehmungsschwelle?
- Welchen Einfluss haben das Objektspektrum, das Adaptationsniveau und der Beobachtungswinkel auf die spektrale Empfindlichkeit an der Wahrnehmungsschwelle?
- Wie stark ist der Unterschied der spektralen Empfindlichkeit der Testpersonen unter der gleichen Testbedingung untereinander (interpersonelle Empfindlichkeitsunterschiede)?

Abbildung 4.1 zeigt die Struktur der Arbeit anhand der einzelnen Kapitel und deren Inhalte in einer Übersicht.

Kapitel der Arbeit	Wesentliche Erkenntnis bzw. durchgeführte Arbeiten
Kapitel 1 <i>Einleitung</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Bedeutung guter Ausleuchtung für die Unfallreduktion bei Nacht • Zwei Entwicklungstendenzen in der Kfz-Frontbeleuchtung: <ul style="list-style-type: none"> - unterschiedliche spektrale Verteilungen der Lichtquellen (Halogen-, Xenonlampe, LED) - räumlich fein aufgelöste Anpassung der Lichtverteilung durch einzelne Pixel möglich • Idee: räumlich unterschiedlich spektral zusammengesetzte Ausleuchtung, falls sinnvoll
Kapitel 2 <i>Grundlagen</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau des Auges und Empfindlichkeiten der Rezeptoren auf der Netzhaut • Hochdynamische Anpassung des Auges an Umgebungsbedingungen (Adaptation) • Relevant für nächtlichen Straßenverkehr: mesopischer Adaptationsbereich • Ermittlungsmethoden für die spektrale Empfindlichkeit und Psychophysik (Übersicht) • Die Achromatische Wahrnehmungsschwelle entspricht der Detektion von Objekten auf Basis von Kontrastunterschieden am Besten und ermöglicht frühestmögliches Reagieren
Kapitel 3 <i>Ergebnisse in der Literatur</i>	<ul style="list-style-type: none"> • zahlreiche Schwellenuntersuchungen vorhanden: leider fast nur im <i>photopischen</i> Bereich • Nur eine geringe Anzahl von Untersuchungen im mesopischen Bereich vorhanden • Parameterauswahl unterschiedlich und fehlende Angaben: keine Vergleichbarkeit • Informationen zum spektralen Verlauf des Adaptationsfeldes in keiner Publikation gegeben • Analyse des Einflusses des Adaptationsspektrums auf die spektrale Empfindlichkeit an der Wahrnehmungsschwelle ist auf Basis vorhandener Untersuchungen nicht möglich
Kapitel 4 <i>Ableitung der Aufgabenstellung</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Frage: Einfluss des Adaptationsspektrums auf die spektrale Empfindlichkeit an der Wahrnehmungsschwelle • Aufbau eines Versuchsstandes zur Ermittlung der achromatischen Unterschiedsschwelle bei kontrollierter Variation der Einflussparameter, insbesondere des Adaptationsspektrums • Wichtige variierte Einflussparameter: Adaptationsspektrum, Beobachtungswinkel, Adaptationsleuchtdichte
Kapitel 5 <i>Beschreibung des Versuchsaufbaus</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung der wesentlichen Komponenten des entstandenen Versuchsaufbaus
Kapitel 6 <i>Kalibrierung des Versuchsaufbaus</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Kalibrierung der Komponenten des Versuchsaufbaus zur Sicherstellung korrekter Messergebnisse
Kapitel 7 <i>Versuchsdurchführung und Parameter</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl und Begründung der Parameterwerte für die Durchführung der Untersuchungen in Bezug auf den Straßenverkehr • Festlegen der Methodik der Versuchsdurchführung • Versuchsablauf
Kapitel 8 <i>Statistische Grundlagen für die Auswertung</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung der Vorgehensweise bei der statistischen Analyse und Erläuterung der wichtigsten Verfahren
Kapitel 9 <i>Ergebnisse der statistischen Analyse</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Darstellung der anhand von Kapitel 8 aufbereiteten Daten
Kapitel 10 <i>Diskussion der Ergebnisse</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Diskussion der Ergebnisse und Vergleich mit der Literatur

Abbildung 4.1: Struktur der Arbeit, Übersicht der einzelnen Kapitel und deren Inhalte

5 Versuchsaufbau

In den nachfolgenden Kapiteln werden die im Labor des Fachgebietes Lichttechnik durchgeführten Untersuchungen zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle (Detektion) beschrieben. Dabei wird auf den entwickelten Versuchsaufbau (Kapitel 5), seine Kalibrierung (Kapitel 6) sowie die Auswahl der Parameter, die Methodik und die Versuchsdurchführung (Kapitel 7) eingegangen.

Abbildung 5.1 zeigt die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entworfene und aufgebaute Versuchsanordnung in einer schematischen, nicht maßstabsgetreuen Übersicht. Ein entsprechendes Foto des vollständigen Aufbaus zeigt Abbildung 6.3 auf S. 52. Die Abmessungen aus Sicht des Probanden betragen 800 mm x 1380 mm x 1380 mm (B x H x T). Das Grundgerüst des Aufbaus ist aus Aluminium-Leichtbauprofilen mit eingesetzten Wandelementen zusammengesetzt (vgl. GUTMANN 2012 [70]). Zur Minimierung des Streulichtes sind die Wandelemente auf der Innenseite mit einer diffus reflektierenden schwarzen Beschichtung versehen, die einen Reflexionsgrad von unter 4 % aufweist. Der Aufbau befindet sich in einem Raum, dessen Wände matt grau gestrichen sind.

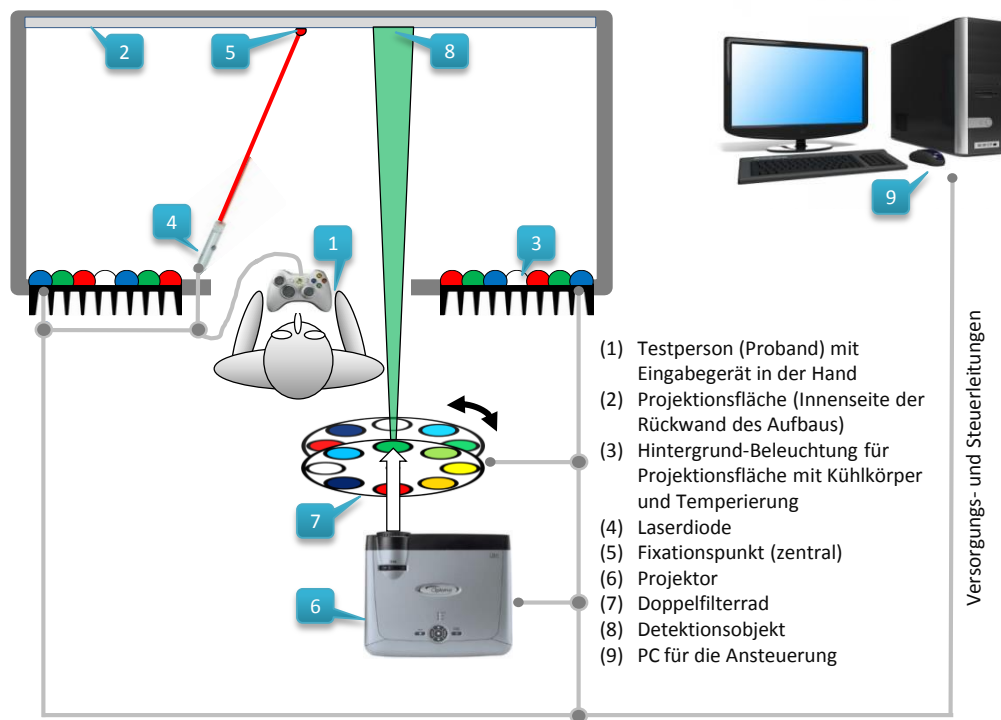


Abbildung 5.1: Gesamtaufbau der Versuchsanordnung (Draufsicht, nicht maßstabsgetreu)

Die Testperson (Proband) sitzt mit einem Eingabegerät in der Hand (1) vor dem Versuchsaufbau und schaut durch eine Öffnung auf die 74 cm x 74 cm große Projektionsfläche (2). Dies entspricht einem Sehwinkel von $\alpha = 54,4^\circ$ (s. Gleichung 5.1). Der wesentliche Bereich des Gesichtsfeld eines Fahrzeugführers, der die relevanten Informationen enthält, weist nach SCHMIDT-CLAUSEN 1990 [149] eine Größe von $12^\circ \times 8^\circ$ auf. Er wird durch den Versuchsaufbau abgedeckt. Als Eingabegerät dient der Controller einer Spielekonsole. Der Kopf des Probanden wird durch einen Gesichtsrahmen mit Kinn- und Stirnstütze in einer definierten Position gehalten. Die Projektionsfläche ist von Innen vor der

Rückwand des Aufbaus aufgestellt. Sie ist grau gestrichen und leicht gegen Projektionsflächen mit anderen Reflexionsgraden austauschbar (vgl. Abschnitt 5.4, S. 44). Bei Bedarf wird sie von der Hintergrund-Beleuchtung (3) angestrahlt (vgl. Abschnitt 5.6, S. 46). Die dafür benötigten Beleuchtungseinheiten sind symmetrisch rechts und links vom Kopf des Probanden in die vordere Wand des Versuchsaufbaus integriert. Eine Laserdiode mit einer Wellenlänge von $\lambda = 650 \text{ nm}$ (4) erzeugt einen frei ausrichtbaren Fixationspunkt (5). Dieser befindet sich in der Regel im geometrischen Zentrum der Projektionsfläche und wird von der Testperson während des Versuchsdurchlaufs anvisiert. Der Gesichtsrahmen wird in der Höhe so eingestellt, dass die zentrale Sehachse des Probanden lotrecht durch den Fixationspunkt verläuft. Der Abstand zwischen den Augen des Probanden und der Projektionsfläche beträgt 72 cm.

Ein digitaler Videoprojektor (6) (vgl. Abschnitt 5.1) dient dazu, definierte Objekte (8) auf der Projektionsfläche zu erzeugen. Nachfolgend werden diese als *Detektionsobjekt* bezeichnet. Form, Größe (Sehwinkel α), und Exzentrizität (Beobachtungswinkel θ) der Detektionsobjekte können dabei flexibel über den Projektor verändert werden. Um den Raum hinter sowie über der Testperson frei zugänglich zu halten und die Projektionsdistanz auf die Optik des Projektors anzupassen, befindet sich der Projektor in Wirklichkeit auf der Rückseite des Versuchsaufbaus. Im Gegensatz zu der in Abbildung 5.1 vereinfachten Darstellung strahlt der Projektor auf einen Spiegel (vgl. Abschnitt 5.3, S. 42), der an der Innenseite der vorderen Wand über dem Kopf der Testperson angebracht ist. Projektor und Spiegel sind in ihrer Ausrichtung so abgestimmt, dass das reflektierte Licht bei einem Vollbild des Projektors die gesamte Projektionsfläche ausleuchtet. Die spektrale Zusammensetzung (Farbe) der Detektionsobjekte kann durch ein Doppelfilterrad mit 22 Interferenzfiltern (7) variiert werden (vgl. Abschnitt 5.2, S. 40). Die Ansteuerung aller Komponenten übernimmt ein zentraler PC (9).

Unter Verwendung von Gleichung 5.1 und den beschriebenen geometrischen Bedingungen berechnet sich der maximal erreichbare Beobachtungswinkel θ_{\max} für ein Detektionsobjekt zu $27,20^\circ$. Dies ist der maximal mögliche Winkel unter dem aus Sicht des Probanden bei mittlerer Fixation ein Objekt am Rand der Projektionsfläche dargestellt werden kann.

$$\text{Beobachtungswinkel } \theta_{\max} = \arctan\left(\frac{\text{Breite der Projektionsfläche} / 2}{\text{Abstand Auge zu Fixationspunkt}}\right) \quad 5.1$$

Verändert man die Position des Fixationspunktes durch eine Neuausrichtung der beweglichen Laserdiode, so lässt sich der Beobachtungswinkel bis zum Faktor zwei erhöhen.

Die Stabilität und Reproduzierbarkeit der Untersuchungsbedingungen ist eine wichtige Grundlage für die Durchführung der Versuche. Deshalb werden die wesentlichen Eigenschaften der Komponenten des Aufbaus nachfolgend beschrieben. Kapitel 6 geht anschließend auf die Kalibrierung dieser Komponenten näher ein.

5.1 Projektor

Ein zentraler Baustein des gesamten Aufbaus ist der digitale Videoprojektor zur Darstellung der Detektionsobjekte. Bei der Auswahl wurden parallel zu einer Recherche Voruntersuchungen mit verschiedenen Projektortypen durchgeführt. Folgende Anforderungskriterien wurden festgelegt:

- *Auflösung:*
keine Erkennbarkeit einzelner Pixel des Detektionsobjektes für den Probanden
- *Projektionsgeometrie:*
vollständige Ausleuchtung der Projektionsfläche bei Vollbild unter der gegebenen relativ kurzen Projektionsdistanz von ca. 180 cm
- *Helligkeit:*
Gewährleistung der Wahrnehmbarkeit der farbig gefilterten Detektionsobjekte bei eingeschalteter LED-Beleuchtung von 1 cd/m^2 unter Berücksichtigung der optischen Verluste (Transmissionsgrade) der verwendeten Filter (vgl. Abschnitt 5.2, S. 40)
- *Streulicht:*
geringer Schwarzwert des Projektors zur Minimierung des Streulichtes im Versuchsaufbau

Nach dem Vergleich der technischen Spezifikationen verschiedener Projektoren und der Durchführung der Vorversuche wurde der Projektor H 7532 BD von Acer ausgewählt (vgl. ACER 2011 [1]). Er besitzt eine Auflösung von 1920×1080 Pixeln (Full HDTV), einen minimalen Projektionsabstand von 150 cm sowie eine Helligkeit von 2000 ANSI Lumen. Der verwendete *Digital Light Processing*-Chip (DLP) der neuesten Generation liefert im Vergleich mit anderen Projektor-Technologien geeignet niedrige Schwarzwerte. Als Basis dieses Prinzips wird eine *Digital Micromirror Device* (DMD) verwendet. Dabei lenken die in einem Array angeordneten kleinen Kippspiegel das auftreffende Licht entweder Richtung Objektiv oder in eine Lichtfalle. Die verwendete P-VIP-Entladungslampe weist eine Gesamtleistung von 230 W bei einer maximalen Lebensdauer von 4000 Stunden auf. Da Entladungslampen im Verlauf der Lebensdauer einen deutlichen Rückgang des Lichtstroms aufweisen (vgl. DERRA et al. 2005 [41]), wird der Projektor in regelmäßigen Abständen kalibriert (vgl. Abschnitt 6.2, S. 51). Von den verfügbaren 1920×1080 Pixeln des Projektors werden ca. 1189×1066 Pixel für die Projektionsfläche benötigt. Konstruktionsbedingt sind vertikal etwas weniger Pixel nutzbar, da durch Abschattungen nicht die volle Höhe der Projektionsfläche verwendbar ist.

5.1.1 Aufwärmverhalten

Vor Versuchsbeginn ist ein frühzeitiges Einschalten des Projektors nötig, um das Stabilisieren der Entladungslampe und des optischen Systems zu gewährleisten. Um das Aufwärmen des Systems genauer charakterisieren zu können, wurde die Beleuchtungsstärke auf der Projektionsfläche über einen Zeitraum von 60 Minuten nach dem Start des Projektors gemessen. Abbildung 5.2 zeigt das Aufwärmverhalten aus dem Kaltstart als normierte Messkurve. Die maximale Helligkeit erreicht der Projektor bereits in den ersten 30 Sekunden nach dem Betätigen des Einschaltknopfes. Danach fällt die Helligkeit ab und stabilisiert sich innerhalb von 5 Minuten bei einem Wert von ca. 95 %. Anhand dieser Erkenntnisse wurde eine Aufwärmzeit von 15 Minuten vor Versuchsbeginn festgelegt. Die noch messbaren Schwankungen in der Helligkeit sind nach PEKARSKI et al. 2003 [132] auf minimale Änderungen im Lichtbogenansatz an der Elektroden der Lampe zurückzuführen. Sie sind ein bekanntes

Phänomen und sind technologisch bedingt nicht vollständig zu vermeiden. Ein ungleichmäßiges Abnutzen der Elektroden verstärkt diesen Effekt und ist nach IGUCHI et al. 2010 [84] zu vermeiden.

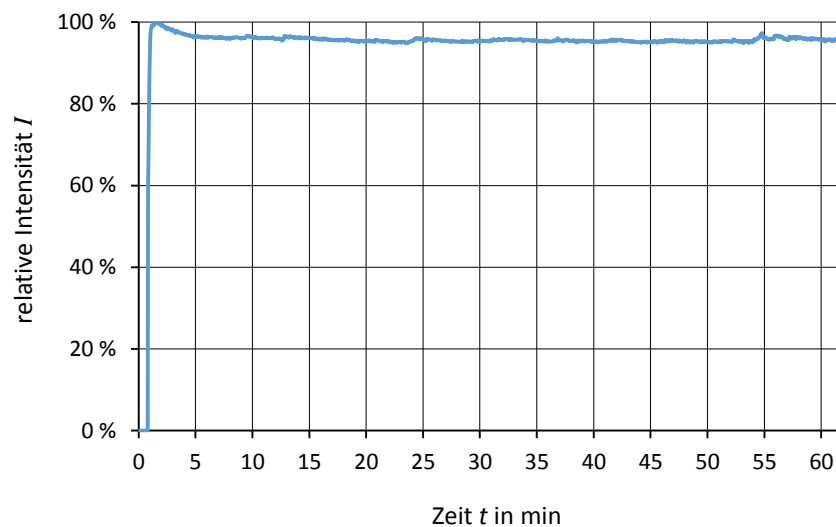


Abbildung 5.2: Aufwärmverhalten des Projektors nach dem Kaltstart

5.1.2 Gammakorrektur

Die Ansteuerung des Projektors erfolgt mittels einer HDMI-Verbindung über den PC (vgl. Abbildung 5.1, S. 36). Um bei elektronisch optischen Anzeigen (vgl. DIN EN ISO 9241-303:2011 [45]) die physikalisch linear wachsende Größe in eine der menschlichen Wahrnehmung entsprechende Größe umzurechnen, ist eine Korrektur erforderlich. Der Zusammenhang zwischen der Eingangsgröße E – hier der Codewert (CV) zwischen 0 und 255 – und der Ausgangsgröße A – hier die gemessene Leuchtdichte, kann wie folgt über eine Potenzfunktion nach Gleichung 5.2 beschrieben werden:

$$\frac{A}{A_{\max}} = \left(\frac{E}{E_{\max}} \right)^{\gamma} \quad \text{einfache Gammakorrektur} \quad 5.2$$

mit:

$$0 \leq A/A_{\max} \leq 1$$

$$0 \leq E/E_{\max} \leq 1$$

Aufgrund des Exponenten γ der Potenzfunktion wird diese Vorgehensweise oft als Gammakorrektur bezeichnet. Diese Korrekturfunktion kann um zusätzliche Größen erweitert werden (vgl. HELD & STRAUß 2007 [77]). Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen ist zu berücksichtigen, dass der Projektor unter realen Bedingungen beim Codewert $CV = 0$ immer etwas Streulicht liefert (Offset: $L_{\min} > 0$). Ebenso ist die maximale Leuchtdichte nicht auf den Wert 1 normiert ($L_{\max} \neq 1$). Unter Einbeziehung dieser Faktoren ergibt sich der Zusammenhang in Gleichung 5.3 (vgl. READ, JENNY C. A. 2014 [139]). Weitere Informationen zur Gammakorrektur sind bei BURGE & BURGER 2006 [20] zu finden.

Für die Versuche wird neben der Gammakorrektur anhand der photometrischen Größe Leuchtdichte L auch eine Ermittlung der radiometrischen Größe Strahldichte L_e durchgeführt. Dies ermöglicht für jeden Codewert die Zuordnung eines entsprechenden Strahldichtewertes zur Absolutkalibrierung des Projektors. Die durchgeführten Messungen und Ergebnisse sind in Abschnitt 6.2 auf S. 51 zu finden.

$$L = \left(\frac{CV}{255}\right)^{\gamma} \cdot (L_{\max} - L_{\min}) + L_{\min} \quad \text{Gammakorrektur mit Offset} \quad 5.3$$

mit:

L Leuchtdichte

CV Codewert [0 .. 255]

L_{\min}, L_{\max} Leuchtdichte bei Codewert $CV = 0$ bzw. 255

5.2 Farbfilter

Für die Durchführung der Untersuchungen ist es erforderlich, dass die Detektionsobjekte mit einer geringen spektralen Bandbreite (quasimonochromatisch) auf der Projektionsfläche dargestellt werden können. Zudem müssen diese Spektren im sichtbaren Bereich durchstimmbar sein. Dabei ist zu beachten, dass dies unter Beibehaltung der durch den Projektor erzeugten Form der Objekte erfolgen muss. Lichtbrechende bzw. beugende Bauelemente wie Prismen und Gitter sind deshalb nicht geeignet. Stattdessen wird das vom Projektor kommende Licht entsprechend gefiltert. Zu diesem Zweck bieten sich mehrere Möglichkeiten an. Die klassische Variante ist die Nutzung von Interferenzfiltern mit einer definierten Transmissionscharakteristik. Diese Vorgehensweise hat sich in der Wissenschaft seit vielen Jahrzehnten bewährt. Weitere Informationen zur Funktionsweise von Interferenzfiltern sind bei MICHLER 2014 [121] zu finden.

5.2.1 Liquid Crystal Tunable Filter (LCTF)

Seit etwas mehr als 10 Jahren bieten die so genannten *Liquid Crystal Tunable Filter (LCTF)* eine preislich erschwingliche Alternative. Das grundlegende Prinzip eines LCTF ist seit Beginn der 1990er Jahre bekannt (vgl. SHARP et al. 1991 [152], MORRIS et al. 1996 [126]). Im Gegensatz zu Interferenzfiltern kann durch das Ansteuern mehrerer hintereinander liegender Flüssigkristallelemente die Transmissionscharakteristik eines LCTF verändert werden. Weitere Vorteile des im Rahmen der vorliegenden Arbeit überprüften LCTF (vgl. PERKINELMER 2013 [133]) sind seine kompakte Bauweise und das Auskommen ohne mechanisch bewegliche Teile. Mit einer sehr schnellen Ansprechzeit von ca. 50 ms kann die Peakwellenlänge des Transmissionsspektrums nahezu stufenlos verändert werden. Interferenzfilter müssen hingegen in drehbaren Filterrädern untergebracht werden. Diese können eine Verstellzeit von mehreren Sekunden aufweisen, um die Wellenlänge λ in diskreten Stufen zu verändern. LCTFs weisen jedoch Nachteile auf, die es je nach Einsatzzweck abzuwägen gilt. Ein wesentlicher Schwachpunkt des LCTF ist die geringe und zudem stark von der Wellenlänge abhängige Transmission. Abbildung 5.3 zeigt anhand gemessener Daten die Transmissionsspektren für einige ausgewählte Wellenlängen.

Für den nutzbaren Spektralbereich des LCTF sind zudem die berechneten Transmissionsgrade τ in Prozent sowie ein angepasstes Polynom zur Beschreibung des Transmissionsverhaltens dargestellt. Es wird deutlich, dass selbst im langwelligen Spektralbereich lediglich ein Transmissionsgrad von weniger als 30 % erreicht wird. Darüber hinaus weist der LCTF eine nur mit großem Aufwand reduzierbare Temperaturabhängigkeit sowie einen begrenzten Einsatzbereich zwischen 10 °C und 40 °C auf (vgl. ZWISLER 1998 [184]; PERKINELMER 2013 [133]).

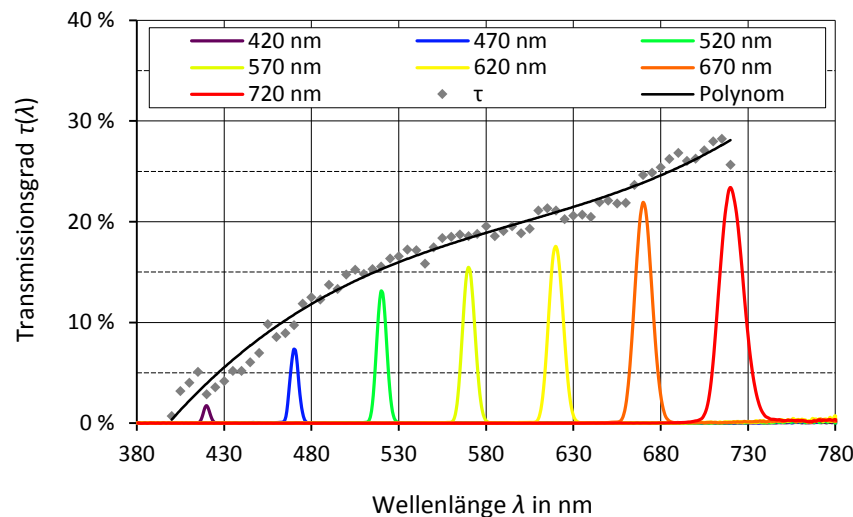


Abbildung 5.3: Transmissionsverhalten des LCTF in Abhängigkeit von der Wellenlänge

5.2.2 Interferenzfilter

Die beschriebene Temperaturabhängigkeit und der sehr niedrige Transmissionsgrad schließen die Verwendung eines LCTF im Rahmen der vorliegenden Arbeit aus. Der schlechte Transmissionsgrad ist im kurzwelligen Spektralbereich um $\lambda = 420$ nm kritisch, da der Projektor hier ohnehin wenig Strahlungsleistung aufweist (vgl. Abbildung 6.5, S. 53). Stattdessen wird ein Satz aus 22 Interferenzfiltern verwendet, der den sichtbaren Spektralbereich in diskreten Schritten von 10 nm abdeckt. Um die Strahlungsleistung des Projektors in vollem Umfang nutzen zu können, werden so genannte Standard-Bandpass-Filter mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Halbwertsbreite von ca. 10 nm verwendet (vgl. ANDOVER CORPORATION 2013/2014 [4]). Die verwendete Filtergröße bildet in der alltäglichen Anwendung eher die Ausnahme. Deshalb sind nur vergleichsweise wenige extern ansteuerbare Filterräder für die gleichzeitige Nutzung einer größeren Filteranzahl verfügbar. Für den Versuchsaufbau wurden aus diesem Grund zwei Filterräder hintereinander angeordnet. Diese weisen jeweils 12 Filterplätze auf und sind per USB ansteuerbar (vgl. FLI 2011 [53]). Da aufgrund der Anordnung jeweils ein Filterplatz je Filterrad frei bleiben muss, können insgesamt 22 Filter verwendet werden. Unter Berücksichtigung der Rezeptorempfindlichkeiten im menschlichen Auge (vgl. Abbildung 2.5, S. 10) wird der Spektralbereich zwischen $\lambda = 420$ nm - 620 nm in 10 nm-Schritten abgedeckt. Den Abschluss im langwelligen Bereich bildet ein Filter bei $\lambda = 650$ nm. Die detaillierte Charakterisierung der verwendeten Filter wird in Abschnitt 6.3 (S. 53) beschrieben.

5.3 Spiegel

Zu Beginn von Kapitel 5 wurde bereits beschrieben, dass das Licht des Projektors zuerst auf einen Spiegel trifft. Das vom Spiegel reflektierte Licht erzeugt anschließend auf der Projektionsfläche das für die Testperson zu detektierende Objekt. Diese geometrische Anordnung wurde aus zwei Gründen gewählt. Einerseits besteht so der Vorteil, dass der Raum über dem Kopf der Testperson frei zugänglich ist und kein Gefühl der Enge entsteht. Andererseits muss die minimale Projektionsdistanz des Projektors berücksichtigt werden. Diese beträgt für die scharfe Abbildung eines Objektes auf der Projektionsfläche mindestens 1,50 m. Im Falle einer Direktprojektion wie in Abbildung 5.1 (S. 36) dargestellt, kann diese Distanz nicht erreicht werden. Die gewählte Alternative über den Spiegel führt zu einer Projektionsdistanz von ca. 1,80 m.

5.3.1 Voruntersuchungen zum Spiegelmateriale

Bei der Auswahl des Spiegelmateriale wurden bei der erforderlichen Größe von 60 cm x 50 cm mehrere Alternativen untersucht. Haushaltsspiegel sind rückseitig mit einer metallischen Reflexionsschicht bedampfte Substrate aus Floatglas. Abbildung 5.4a zeigt den prinzipiellen Verlauf eines auf den Spiegel auftreffenden Lichtstrahls. Das auf der Projektionsfläche erzeugte Objekt (vgl. Abbildung 5.4b) setzt sich aus drei Teilen zusammen. Ein kleiner Anteil des auftreffenden Lichtes wird unter dem Winkel α_{p1} direkt an der Glasoberfläche reflektiert und auf der Projektionsfläche abgebildet. Der Hauptanteil wird an der Oberfläche gebrochen, durchdringt unter dem Winkel β das Glas und trifft auf die metallische Reflexionsschicht auf der Rückseite des Glassubstrates. Dort wird das Licht reflektiert. Der größte Anteil des reflektierten Lichtbündels wird beim Verlassen des Glassubstrates ein weiteres Mal gebrochen. Unter dem Winkel α_{p2} trifft es mit einem räumlichen Versatz auf die Projektionsfläche. Ein kleiner Teil des reflektierten Lichts wird an der Innenseite des Glassubstrates und an der Reflexionsschicht erneut reflektiert. Unter dem Winkel α_{p3} verlässt es das Glas und trifft auf die Projektionsfläche.

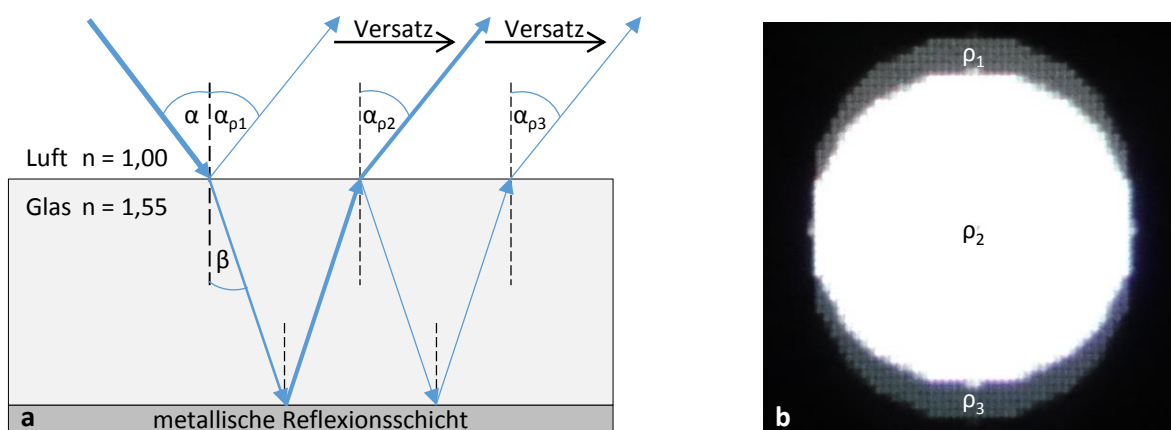


Abbildung 5.4: Versatz des Objektes durch mehrfache Brechung (Haushaltsspiegel)

a) Prinzipskizze des Strahlenverlaufs

b) Foto eines Detektionsobjektes auf der Projektionsfläche

Dabei gilt zwischen den Winkeln der Zusammenhang $\alpha = \alpha_{p1} = \alpha_{p2} = \alpha_{p3}$. Mit zunehmender Materialstärke des Glassubstrates treten immer deutlicher werdende Bildverzerrungen auf. Abbildung 5.4b verdeutlicht, dass die Nutzung eines Haushaltsspiegels aus diesem Grund nicht zweckmäßig ist. Eine Möglichkeit den Versatz in der Abbildung des Detektionsobjektes zu vermeiden, besteht in der Verwendung spiegelnder Oberflächen. In der Leuchtenindustrie werden Aluminiumbleche in unterschiedlicher Ausprägung und Oberflächengüte für Reflektoren verwendet. Ein Vorteil sind die geringen Anschaffungskosten, der flexible Zuschnitt nach gewünschter Größe sowie die Verfügbarkeit unterschiedlich beschaffener Oberflächen. Nach Rücksprache mit einem Hersteller wurden Muster des Materials MIRO 27 (vgl. ALANOD 2012 [3]) in entsprechender Größe zur Verfügung gestellt. Bei diesem Material wird anodisiertes Aluminium im PVD-Verfahren mit Reinstaluminium beschichtet und anschließend mit reflexionsverstärkenden Schichten aus Oxiden versehen. Mit diesem Aufbau wird ein Reflexionsgrad von mehr als 95 % erreicht. Die ersten Tests zeigten jedoch eine durch die Bearbeitung nicht vermeidbare Diffus-Reflexion der Oberfläche und eine daraus resultierend unscharfe Abbildung. Aufgrund der Materialstärke von 0,75 mm zeichnen sich zudem Unebenheiten im Material sehr stark in der Abbildung des Objektes ab (vgl. Abbildung 5.5). Das Reflektormaterial ist deshalb für den hier vorgesehenen Zweck ungeeignet.

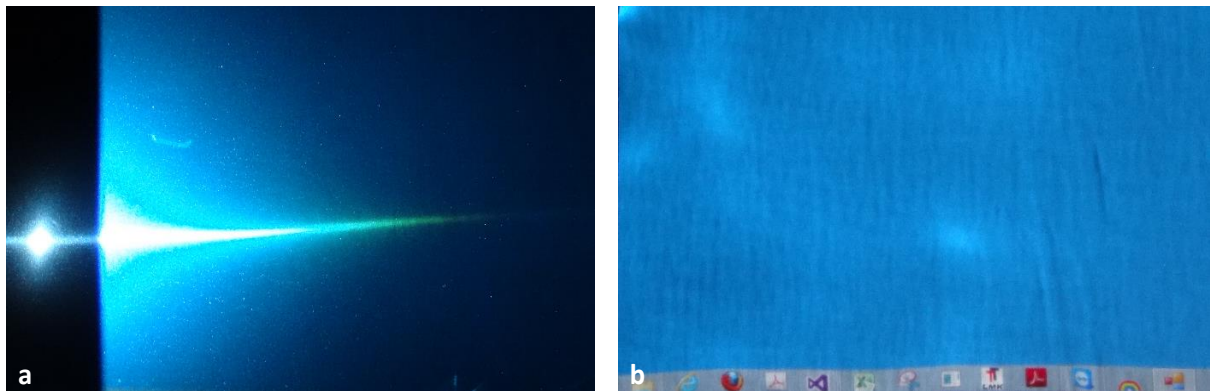


Abbildung 5.5: Verzerzte Abbildung durch das Spiegelmaterial MIRO 27

- a) Oberfläche des Materials unter Teil-Beleuchtung durch den Projektor
- b) Darstellung eines Windows Desktop auf der Projektionsfläche

5.3.2 Oberflächenspiegel

Die durchgeführten Voruntersuchungen zeigen, dass nur ein hochvergüteter Oberflächenspiegel die Anforderungen erfüllt. Ein Nachteil von Oberflächenspiegeln ist die hohe Empfindlichkeit der Oberfläche. Bereits geringe mechanische Belastungen beim Reinigen können zu nicht reversiblen Schäden führen. Zudem sind Oberflächenspiegel, insbesondere die hier erforderliche Anfertigung nach individuellen Anforderungen, sehr kostenintensiv. Nach einer Recherche wurde ein Hersteller gefunden, der einen Oberflächenspiegel in der geforderten Größe herstellen kann. Abbildung 5.6a zeigt den prinzipiellen Aufbau des Spiegels. Das als Basismaterial verwendete 5 mm starke Floatglas wird zuerst poliert, um aus dem Herstellungsprozess resultierende Unebenheiten in der Oberfläche zu entfernen. Anschließend wird eine 100 nm dünne Aluminiumschicht aufgedampft, die zum Schutz mit

Siliziumdioxid versiegelt wird. Trotz dieser Schutzschicht ist die Oberfläche des Spiegels sehr empfindlich. Ein Reinigen ist nur durch Abspülen mit destilliertem Wasser oder Alkohol möglich. Abbildung 5.6b zeigt den spektralen Reflexionsgrad ρ des Spiegels. Im sichtbaren Bereich beträgt der Reflexionsgrad nach Herstellerangaben durchgängig zwischen 83 % und 87 % (vgl. S1 OPTICS 2014 [141]).

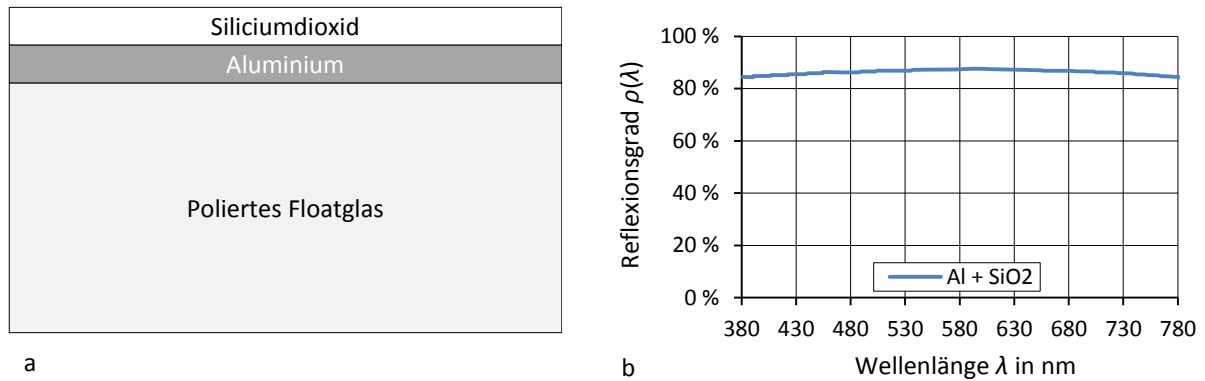


Abbildung 5.6: Eigenschaften des verwendeten Oberflächenspiegels
a) Schichtaufbau (Trägermaterial, Reflexions- und Schutzschicht)
b) Spektraler Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$ im sichtbaren Bereich

5.4 Projektionsfläche

Abbildung 5.7a zeigt schematisch die verwendete quadratische Projektionsfläche mit dem roten Fixationspunkt im geometrischen Mittelpunkt. Neben den in Abschnitt 4 bereits beschriebenen Eigenschaften ist zusätzlich die Bemaßung für 4 Kalibrierpunkte am rechten und linken Rand der Projektionsfläche angegeben. Diese werden für die in Abschnitt 6.1 (S. 49) beschriebene geometrische Kalibrierung benötigt. Sie transformiert die Pixel des Projektors in das Koordinatensystem aus Sicht der Versuchsperson, um die korrekte Position und Größe eines Detektionsobjektes sicherzustellen.

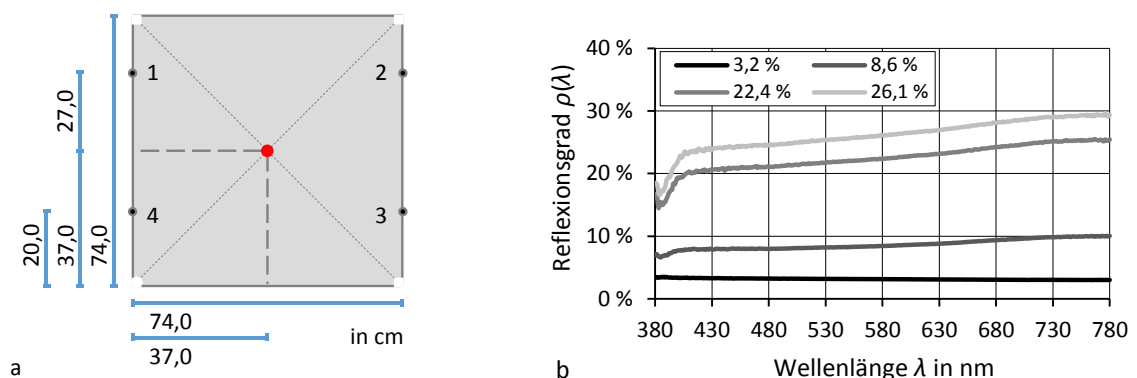


Abbildung 5.7: Projektionsfläche für das Detektionsobjekt
a) Abmessungen und Kalibrier-Markierungen inkl. Fixationspunkt
b) Reflexionsgrad von vier unterschiedlich beschichteten Projektionsflächen

Abbildung 5.7b zeigt die gemessenen spektralen Reflexionsgrade von vier unterschiedlich beschichteten Projektionsflächen. Bei Erreichen der maximalen Helligkeit eines Detektionsobjektes (Leistungsgrenze des Projektors) kann durch leichten Austausch der Projektionsfläche der Arbeitsbereich erweitert werden. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurde die Rückwand mit 8,6 % Reflexionsgrad verwendet.

5.5 Detektionsobjekt

In Abschnitt 5.1 wurde für den Projektor eine hohe Auflösung gefordert, so dass einzelne Pixel bei der Darstellung für den Betrachter visuell nicht mehr auflösbar sind. Die Erfüllung dieser Forderung wird anhand der nachfolgenden Betrachtung überprüft.

Die typischen Mikrospiegel eines DMD besitzen eine Kantenlänge von $16\text{ }\mu\text{m}$ mit einem Abstand von $1\text{ }\mu\text{m}$ zu den benachbarten Spiegeln. Stellt man über den Projektor ein rundes Objekt mit der Größe von 3° dar, so werden dafür horizontal 68 Pixel und 67 Zwischenräume (Abstände) verwendet. Berücksichtigt man das Verhältnis von 16:1 zwischen Pixelbreite und Abstand zum Nachbapixel, so ergibt sich Gleichung 5.4:

$$3^\circ = 180' = 68 \cdot 16 \cdot x + 67 \cdot x \quad 5.4$$

mit:

x = Winkelgröße des Pixelabstandes in Winkelminuten

Aus Gleichung 5.4 errechnet sich der Abstand zwischen zwei Pixeln in Winkelminuten zu $0,156'$.

Der kleinste Winkel, unter dem zwei getrennt voneinander befindliche Objekte gerade noch als voneinander getrennt wahrgenommen werden können, wird als Winkelsehschärfe bezeichnet (vgl. LACHENMAYR et al. 2006 [106], Abbildung 2.3 rechts, S. 7). Sie wird in Winkelminuten angegeben und alternativ auch als *angulare Sehschärfe* oder *Minimum Separabile* bezeichnet. In der frühen Astronomie stellte man fest, dass zwei Sterne für einen normalsichtigen Menschen gerade noch unterscheidbar sind, wenn sie zueinander den Winkel von einer Winkelminute ($1'$) nicht unterschreiten (vgl. GROSVENOR 2007 [69]).

Aus diesem Grund wird in der Literatur dieser Wert für die normale Sehschärfe und den daraus berechneten Visus verwendet (vgl. SILBERNAGL et al. 2001 [153]). Die Winkelsehschärfe variiert in der Praxis. Selbst unter Laborbedingungen wird ein Wert von $20\text{--}30''$ jedoch nicht unterschritten (vgl. BREDEMEYER et al. 1978 [17]). Berücksichtigt man zudem, dass die Winkelsehschärfe mit zunehmender Exzentrizität stark abnimmt, so kann der berechnete Pixelabstand von $0,156'$ selbst unter günstigen Bedingungen nicht mehr aufgelöst werden.

Die spektralen Daten der für die Objekte verwendeten Farbfiler werden in Abschnitt 6.3 (S. 53), die Auswahl der weiteren Eigenschaften der Objekte in Abschnitt 7.1 (S. 59) beschrieben.

5.6 Hintergrund-Beleuchtung

Die in Abbildung 5.1 auf S. 36 dargestellte Hintergrund-Beleuchtung dient dazu, die Projektionsfläche diffus zu beleuchten. Das erzeugte Licht stellt die Augen des Probanden durch Adaptation auf einen definierten Arbeitspunkt ein (vgl. Abschnitt 2.1.3, S. 10). Um den Einfluss des so erzeugten Adaptationsspektrums auf die Objektdetektion untersuchen zu können, müssen das spektrale Verhalten und das absolute Beleuchtungsniveau der Hintergrund-Beleuchtung flexibel einstellbar sein. Für die Realisierung wurde entschieden, über den sichtbaren Bereich verteilte farbige LEDs zu verwenden.

5.6.1 Aufbau

Die Basis für die LED-Beleuchtung bilden zwei schwarz eloxierte Aluminiumprofile. Diese dienen als Kühlkörper und sind symmetrisch mit LEDs unterschiedlicher Emissionsspektren bestückt. Die beiden LED-Einheiten sind rechts und links vom Kopf des Probanden in die vordere Wand des Versuchsaufbaus eingelassen.

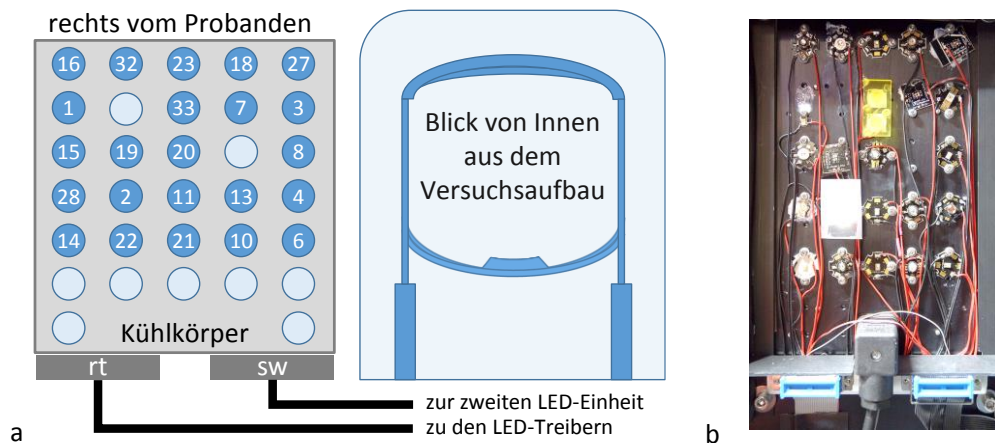


Abbildung 5.8: Hintergrund-Beleuchtung

a) Prinzipskizze: Anordnung der Kanäle (Blick von innen)

b) Foto der LED-Beleuchtung rechts vom Kopf des Probanden

Abbildung 5.8a zeigt den prinzipiellen Aufbau der Beleuchtungseinheit rechts vom Kopf des Probanden. Die auf dem rechten und linken Kühlkörper angebrachten LEDs des gleichen Typs sind jeweils zu einem Ansteuerungskanal in Reihe zusammengeschaltet. Die Versorgung der insgesamt 32 verfügbaren LED-Kanäle erfolgt über Treiber-Bausteine, die auf einer Elektronikplatine zusammen mit einem Microcontroller angeordnet sind. Dieser kann über den zentralen PC jeden LED-Kanal durch Pulsweitenmodulation (PWM) oder durch Veränderung des Betriebsstroms separat mit einer Auflösung von 12 Bit ansteuern und damit die Helligkeit verändern.

Derzeit werden 23 verschiedene LED-Typen genutzt. Auf die Spektren der einzelnen LED-Kanäle wird in Abschnitt 6.4 (S. 55) eingegangen. Die freien Kanäle sind bei Bedarf für die Erweiterung mit zusätzlichen LEDs vorgesehen. Abbildung 5.8b zeigt ein Foto der Beleuchtungseinheit rechts vom Kopf des Probanden.

5.6.2 Temperierung

Die lichttechnischen und elektrischen Parameter der LEDs ändern sich mit der Temperatur. Da sich die LEDs für jede der beiden Beleuchtungseinheiten auf einem gemeinsamen Kühlkörper befinden, sind sie thermisch miteinander verbunden. Je nach eingestelltem Betriebsstrom der einzelnen LED-Kanäle variiert die lokale Temperaturverteilung auf dem Kühlkörper. Stabile und reproduzierbare Bedingungen sind dadurch schwer zu erreichen. Zudem kann es sehr lange dauern, bis eine stabile Betriebstemperatur der LEDs erreicht wird. Um diese Effekte zu reduzieren, wird eine Temperierung der Kühlkörper verwendet. Je Beleuchtungseinheit sind sechs Heizwiderstände zusammen mit einem mittig angeordneten Temperatursensor zwischen den Rippen des Kühlkörpers angebracht.

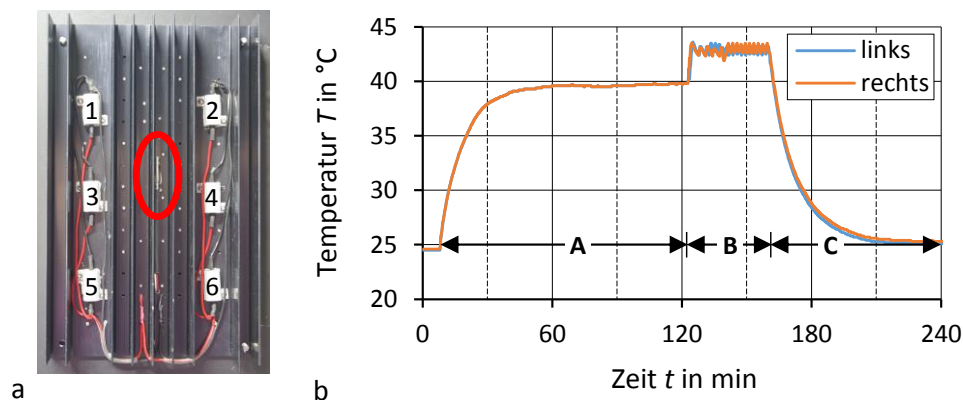


Abbildung 5.9: Temperierung der Hintergrund-Beleuchtung

- a) Foto: Anordnung der 6 Heizwiderstände und des Temperatursensors (rot)
- b) zeitlicher Temperaturverlauf ohne und mit Temperierung
 - A: LEDs auf 100 % EIN, Temperierung AUS
 - B: LEDs auf 100 % EIN, Temperierung EIN
 - C: LEDs und Temperierung AUS

Abbildung 5.9a zeigt ein Foto der linken LED-Beleuchtungseinheit. Zu erkennen sind die Kühlrippen, die sechs Heizwiderstände und der mittig mit Wärmeleitkleber befestigte Temperatursensor. Werden im ungünstigsten Fall alle LEDs von Raumtemperatur aus mit maximalem Strom eingeschaltet, so ergibt sich der zeitliche Temperaturverlauf in Abbildung 5.9b. Erst nach einer Dauer von ca. zwei Stunden wird am Kühlkörper die Endtemperatur von etwa 40 $^{\circ}\text{C}$ erreicht (A). Basierend auf diesen Messdaten wurde mit $43^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ eine Regeltemperatur über diesem Wert ausgewählt. Wird die Temperaturregelung aktiviert, während die LEDs eingeschaltet bleiben, so zeigt sich der Verlauf ab Minute 123 in Abbildung 5.9b (B). So kann gewährleistet werden, dass die LEDs innerhalb weniger Minuten betriebsbereit sind und von der Temperatur her einen weitgehend konstanten Arbeitspunkt aufweisen.

5.7 Hintergrund-Filter

Durch das nichtlineare Verhalten der für die Hintergrund-Beleuchtung verwendeten LEDs und die unterschiedlichen Offset-Ströme (vgl. Abschnitt 6.4, S. 55) ist der Betrieb mit geringen Strömen nicht

empfehlenswert. Um die LEDs je nach zu erzeugender Adaptationsleuchtdichte im mittleren Bereich der Aussteuerung betreiben zu können, sind dämpfende Filter erforderlich. Aufgrund der großen Fläche der Beleuchtungseinheiten der Hintergrund-Beleuchtung (vgl. Abschnitt 5.6, S. 46), sind konventionelle Neutraldichtefilter bzw. Graufilter aus Glas nicht verfügbar.

Es wurden mehrere Alternativen untersucht: ND Filterfolien (LEE FILTERS 2014 [110], KODAK 2014 [98]) und lineare Polarisationsfilter aus Kunststoff für den sichtbaren Bereich (EDMUND OPTICS 2014 [47]). Diese Filterlösungen sind spektral jedoch nicht vollständig aselektiv. Bei wenig Dämpfung nimmt die Transmission im kurzwelligen Bereich unter 450 nm ab, über 650 nm nimmt sie stark zu. Abbildung 5.10 zeigt den typischen Verlauf der spektralen Transmission der untersuchten Lee ND-Filterfolien, wenn für eine hohe Dämpfung mehrere Filterfolien hintereinander verwendet werden. Da im Bereich über 680 nm nur wenige LEDs in der Hintergrund-Beleuchtung zur Verfügung stehen (vgl. Abbildung 6.7, S. 56), ist eine spektrale Anpassung und Optimierung an ein Zielspektrum nur sehr schwer oder überhaupt nicht möglich.

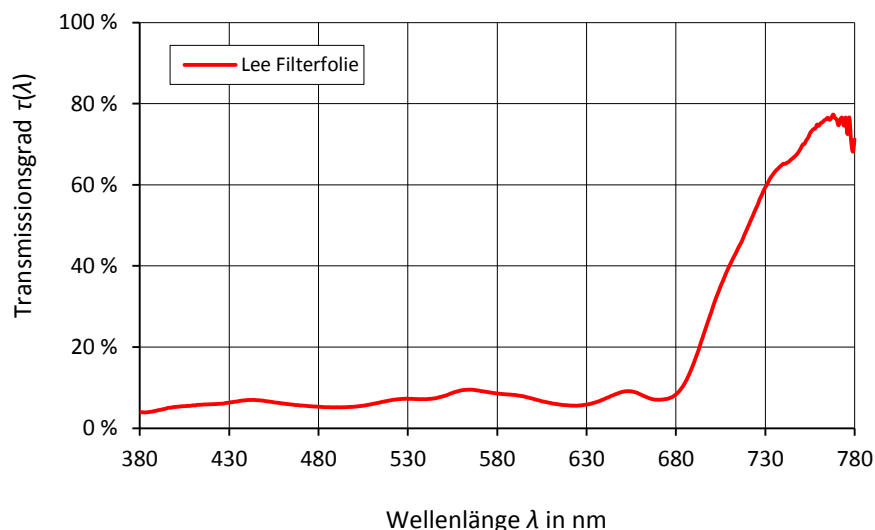


Abbildung 5.10: Spektraler Transmissionsgrad der untersuchten Lee ND-Filterfolien

Als alternative Lösung wurden in mehreren Versuchsreihen dünne Kunststofffolien anhand eines Laserdruckers mit einem feinen Raster aus schwarzen Punkten bedruckt. Die Messergebnisse der durchgeführten Kalibrierung zeigt Abbildung 6.9 in Abschnitt 6.5 (S. 57). Die so erzeugten Filterfolien sind auf einfache aber effektive Weise für die Einstellung des richtigen Arbeitspunktes der Hintergrund-Beleuchtung äußerst gut geeignet.

So konnten Filterfolien in flexibler Größe mit unterschiedlichen Transmissionsgraden erzeugt werden. Diese Folien bieten zudem den Vorteil, dass das streuende Verhalten zu einer Homogenisierung der spektralen Verteilung der einzelnen LEDs der Hintergrund-Beleuchtung auf der Projektionsfläche beiträgt.

6 Kalibrierung

Nachfolgend wird die Kalibrierung der in Kapitel 4 beschriebenen Komponenten des Versuchsaufbaus näher beschrieben. Die einzelnen Kalibrierschritte dienen dazu, die geometrischen und radiometrischen Werte des Versuchsaufbaus zu ermitteln und mit den in der Ablaufsteuerung eingestellten Werten abzugleichen. Die in der Software eingestellten Werte - beispielsweise die Größe eines Objektes - stimmen auf diese Weise mit den realen Gegebenheiten im Versuchsaufbau überein.

Die Kalibrierung des Versuchsaufbaus mit allen seinen Komponenten findet in fünf voneinander getrennten Schritten statt. Um die Vergleichbarkeit der Versuchsbedingungen zu gewährleisten, wurde die Kalibrierung in regelmäßigen Abständen durchgeführt – mindestens 1 Mal pro Woche. Für jeden Kalibrierschritt steht ein eigenes Programm mit einer Bedienoberfläche zur Verfügung. Dies erleichtert die Benutzerführung und ermöglicht eine weitgehende Automatisierung der Messungen. Nach jedem Kalibrierschritt wird ein Satz von Kalibrierdaten gespeichert, der für die nachfolgende Kalibrierung benötigt und zuvor geladen wird. Abbildung 6.1 zeigt schematisch das Vorgehen bei der Durchführung der Kalibrierung (1) und das anschließende Laden der erzeugten Kalibrierdaten für die Durchführung der Versuche (2).

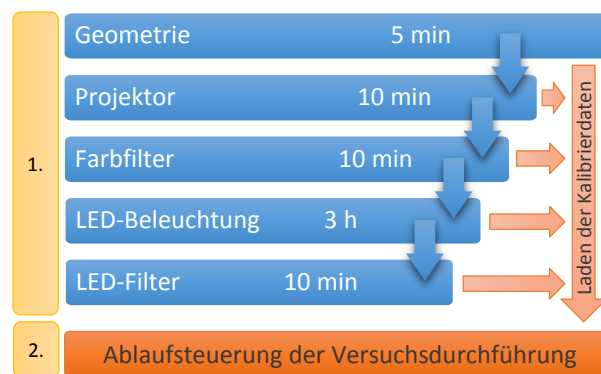


Abbildung 6.1: Arbeitsschritte und benötigte Dauer zum Kalibrieren des Versuchsaufbaus

Die meisten Kalibrierungsmessungen können innerhalb weniger Minuten durchgeführt werden. Lediglich die Kalibrierung der LED-Beleuchtung dauert je nach gewählter Auflösung mehrere Stunden. Aus diesem Grund wurde diese Messung vorzugsweise über Nacht durchgeführt. Nach der erfolgreichen Durchführung der fünf Kalibrierschritte werden die erzeugten Kalibrierdaten in der Ablaufsteuerung für die Versuchsdurchführung geladen und verwendet. Die folgenden Abschnitte gehen auf die einzelnen Kalibrierschritte und die durchzuführenden Messungen ein.

6.1 Geometrische Kalibrierung

Die geometrische Kalibrierung bildet den ersten Kalibrierschritt. Sie ordnet die Pixel des Projektors dem Koordinatensystem des Versuchsaufbaus zu. Damit ist sichergestellt, dass die in der Software eingestellten geometrischen Größen den realen Bedingungen auf der Projektionsfläche entsprechen. Die Pixel des Projektors können in dem Kalibrierprogramm einzeln oder in Gruppen definierter

Größe angesteuert werden. Entsprechend der Betätigungsrichtung eines Joysticks am Eingabegerät des Probanden werden die Pixel nacheinander aktiviert. Das sichtbare Pixel scheint über die Projektionsfläche zu „wandern“, bis das aktive Pixel deckungsgleich mit Referenzpunkt 1 (vgl. Abbildung 5.7a, S. 44) ist. Dieser Referenzpunkt bildet den Koordinatenursprung des Bezugssystems auf der Projektionsfläche. Durch Drücken einer Taste am Eingabegerät (Bestätigung) wird dem gerade aktiven Pixel des Projektors die xy-Koordinate ($x = 0 \text{ cm} / y = 0 \text{ cm}$) zugewiesen.

Anschließend wird über den Joystick des Eingabegerätes der Referenzpunkt 2 angefahren. Da die Abmessungen zwischen den Referenzpunkten auf der Projektionsfläche bekannt sind, wird dem jetzt aktiven Pixel der dem Abstand in cm entsprechende Wert in xy-Richtung ($x = 74 \text{ cm} / y = 0 \text{ cm}$) zugewiesen. Ebenso wird mit den Referenzpunkten 3 und 4 verfahren. Zum Abschluss der geometrischen Kalibrierung wird der Fixationspunkt auf die gleiche Weise angefahren. Aus den vier Kalibrierpunkten und den bekannten Koordinaten des Fixationspunktes ($x = 37 \text{ cm} / y = -27 \text{ cm}$) kann das dem Fixationspunkt entsprechende Pixel berechnet werden. Der Vergleich zwischen diesem berechneten Pixel und dem zuvor manuell per Joystick angefahrenen Pixel für den Fixationspunkt dient zur Überprüfung der Genauigkeit. Die horizontale bzw. vertikale Abweichung (Versatz) beträgt bei einer präzisen Kalibrierung weniger als ein halbes Pixel.

Neben der korrekten Ausrichtung ist auch die richtige Darstellung der Objektgröße erforderlich. Hierzu wird der Abstand zwischen dem Auge der Testperson und der Projektionsfläche in das Kalibrierprogramm eingetragen. Daraus berechnet sich der Sehwinkel α für ein rundes und zentral dargestelltes Detektionsobjekt nach Gleichung 6.1 wie folgt:

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{r}{d} \quad \text{Sehwinkel des Detektionsobjektes} \quad 6.1$$

mit:

α Sehwinkel

r Radius des Detektionsobjektes

d Abstand Auge – Projektionsfläche (hier: 720 mm)

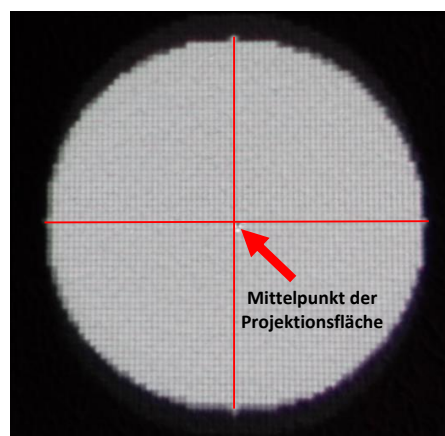


Abbildung 6.2: Detektionsobjekt (Foto) zur Überprüfung der Kalibrierung ($\alpha = 3^\circ$, $\theta = 0^\circ$)

Zur Überprüfung der Größendarstellung wurde im Kalibrierprogramm für ein rundes Objekt unter dem Beobachtungswinkel $\theta = 0^\circ$ ein Sehwinkel von $\alpha = 3^\circ$ eingestellt. Abbildung 6.2 zeigt das auf der Projektionsfläche dargestellte Objekt mit einem gemessenen Radius von 19 mm. Berechnet man den Sehwinkel α nach Gleichung 6.1 so ergibt sich ein Wert von $3,023^\circ$. Aus DIN 1319-1 [44] errechnet sich daraus ein Fehler von $0,023^\circ$ und ein daraus abgeleiteter relativer Fehler von 0,77 %.

6.2 Kalibrierung des Projektors

Die Kalibrierung des Projektors dient dazu, für jeden eingestellten Codewert des Projektors exakt die absolute spektrale Strahldichte sowie die spektrale Verteilung des Objektes auf der Projektionsfläche zu kennen. Auf diese Weise kann auf eine manuelle Messung der Strahldichte am Ende eines Versuchsdurchlaufs verzichtet werden. Dies führt zu einer deutlichen Verkürzung der Testdauer.

Die Helligkeit des Projektors kann mit einer Auflösung von 256 Stufen (8 Bit) eingestellt werden. Die elektrooptische Übertragungsfunktion (vgl. DIN EN ISO 9241-303:2011 [45]) des Projektors ist nichtlinear. Aus diesem Grund wird im Anschluss an die geometrische Kalibrierung in Abschnitt 6.1 die Kennlinie des Projektors ermittelt. Als Genauigkeit hat sich eine Auflösung von 16 Codewert-Stufen bewährt. Zur Durchführung der Kalibrierung wird ein Spektroradiometer vom Typ Konica Minolta CS-2000 verwendet (vgl. KONICA MINOLTA INC. 2014 [101]). Dieses wird an der Stelle aufgestellt, wo die Testperson für den Versuchsablauf üblicherweise ihren Kopf positioniert. Mittels Blick durch das Okular wird das Objektiv des Spektroradiometers visuell auf die Stelle ausgerichtet, an der das Detektionsobjekt für die jeweilige Versuchsbedingung erscheint.

Aus der Beobachterposition wird für jede Codewert-Stufe die spektrale Strahldichte $L_e(\lambda)$ im sichtbaren Bereich zwischen 380 und 780 nm gemessen. Die so durchgeführte Kalibrierung ist nur für die gewählte Versuchsbedingung (Objektform, α , θ) gültig. Wird ein Parameter verändert, so wird die Kalibrierung für diese Situation erneut durchgeführt.

Die einzelnen Farbkanäle des Projektors werden durch ein rotierendes Filterrad im Strahlengang mit jeweils einem Sektor für jede Farbe realisiert. In Kombination mit dem synchronisierten Schalten der Kippspiegel des DMD kann für jeden Farbkanal die Helligkeit variiert werden. Für die durchgeführten Spektralmessungen wurde die Rotationsfrequenz des Filterrades mit einer Fotodiode zu 120 Hz ermittelt. Das Spektroradiometer wurde in der Frequenz entsprechend angepasst. Für die durchgeführten Untersuchungen ist nur der Weißkanal des Projektors von Bedeutung, da die Farbe der Detektionsobjekte über die Interferenzfilter erzielt wird (vgl. Abschnitt 5.2, S. 40). Aufgrund der Vollständigkeit werden die Farbkanäle bei der Kalibrierung jedoch mit berücksichtigt.

Abbildung 6.3a zeigt zur Veranschaulichung einen Probanden, der mit dem Eingabegerät in der Hand das weiße Detektionsobjekt auf der Projektionsfläche betrachtet. Anstelle des Probanden zeigt Abbildung 6.3b das für die Kalibrierung positionierte Spektroradiometer. Für die Durchführung der Messungen wird die Seitentür des Versuchsaufbaus geschlossen und das Licht im Raum ausgeschaltet.

Abbildung 6.4a zeigt die aus den Messdaten ermittelten und Abbildung 6.4b die resultierenden normierten Kennlinien des Projektors für die drei Farbkanäle Rot, Grün und Blau sowie für den daraus gemischten Weißkanal (Graustufen). In Abbildung 6.4a sind der mit $0,0358 \text{ cd/m}^2$ vorhandene Offset

sowie die unterschiedlichen Maximalwerte jedes Kanals ersichtlich. Für die normierten Kennlinien in Abbildung 6.4b ist zu erkennen, dass die Kurven Grün, Blau und Weiß fast vollständig übereinander liegen. Lediglich der rote Kanal weist eine leicht abweichende Kennlinie auf. Das wird auch aus den ermittelten Gammawerten deutlich. Tabelle 6.1 zeigt die aus Abbildung 6.4b durch Fitfunktionen ermittelten Gammawerte der einzelnen Kanäle des Projektors. Anhand der beschriebenen Vorgehensweise lässt sich das Verhalten des Projektors mathematisch beschreiben und für die Durchführung der Versuche kalibrieren.

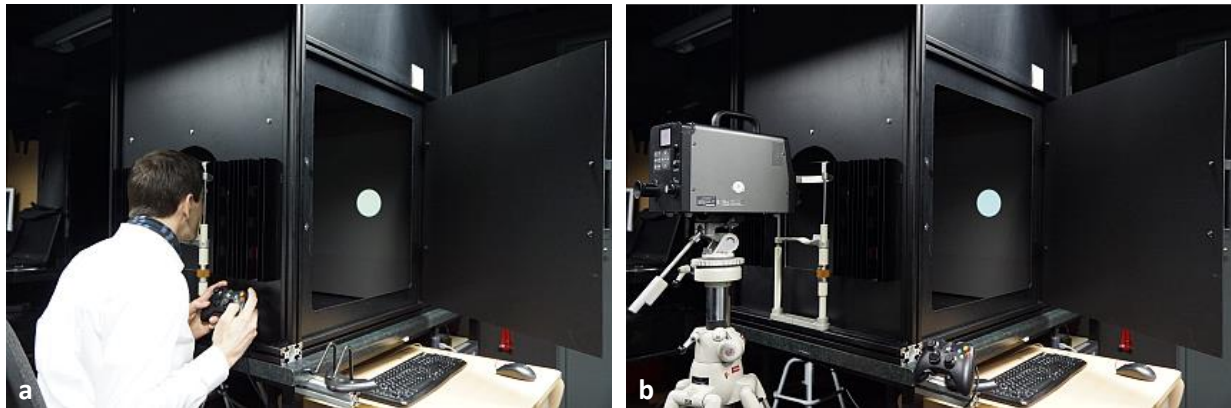


Abbildung 6.3: Blick auf den Versuchsaufbau bei geöffneter Seitentür
a) Proband mit Eingabegerät blickt auf das Detektionsobjekt
b) für die Kalibrierung positioniertes Spektroradiometer

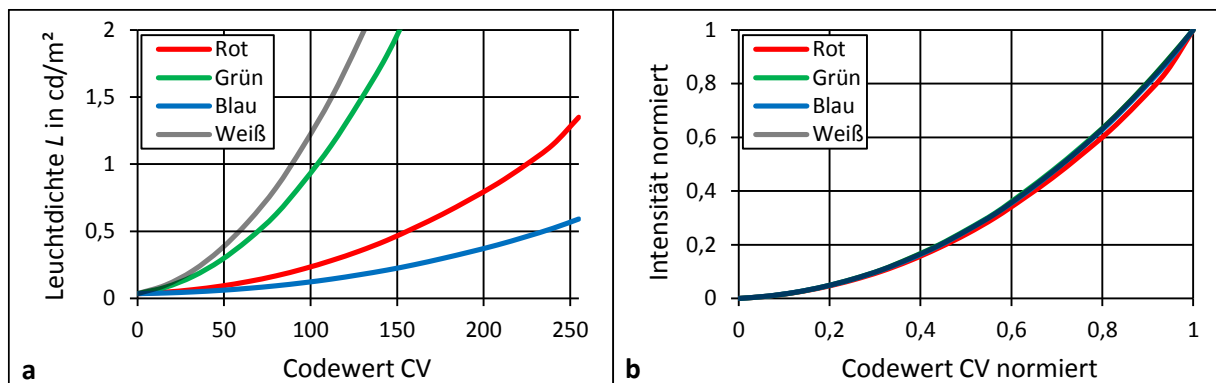


Abbildung 6.4: Kennlinien des Projektors für die Kanäle Rot, Grün, Blau und Weiß
a) gemessene Leuchtdichte je Codewert [0..255], mit Offset und Gain
b) normierte Gammakurven

Tabelle 6.1: Gammafaktoren der einzelnen Kanäle des Projektors

Kanal	Rot	Grün	Blau	Weiß
γ	2,1312	1,9880	2,0172	2,0153

Abbildung 6.5 zeigt für ein rundes Objekt der Größe $\alpha = 2^\circ$ die auf der Projektionsfläche unter $\theta = 0^\circ$ gemessene maximale spektrale Strahldichte jedes Farbkanals je Wellenlänge. In den entsprechenden Farben ist die Filtercharakteristik für den roten, grünen und blauen Spektralbereich dargestellt, die durch das rotierende Filterrada entsteht. In ihrer Überlagerung (Addition) bilden sie das grau dargestellte Spektrum, das als „weiß“ empfunden wird. In den Bereichen unter 400 nm und über 730 nm liefert der Projektor kein Licht. Durch die ungünstige Anpassung des roten und grünen Filters entsteht um 590 nm eine Lücke im Spektrum des Projektors. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass sowohl der verfügbare Spektralbereich, als auch die absoluten Intensitäten des Projektors als Ausgangspunkt für die durchzuführenden Untersuchungen ausreichend sind.

Über die gemessenen Kennlinien und die daraus errechneten Gammafaktoren ist eine direkte Zuordnung zwischen dem Codewert (CV) und der absoluten spektralen Strahldichte $L_e(\lambda)$ eines Objektes auf der Projektionsfläche möglich. Für jede Versuchsbedingung kann dieser Zusammenhang basierend auf den durchgeführten Messungen separat als Funktion beschrieben werden. Diese Vorgehensweise bietet den Vorteil, dass der gesamte optische Pfad vom Projektor über die Reflexion an Spiegel und Projektionsfläche bis zum Auge der Testperson messtechnisch erfasst und absolut kalibriert wird.

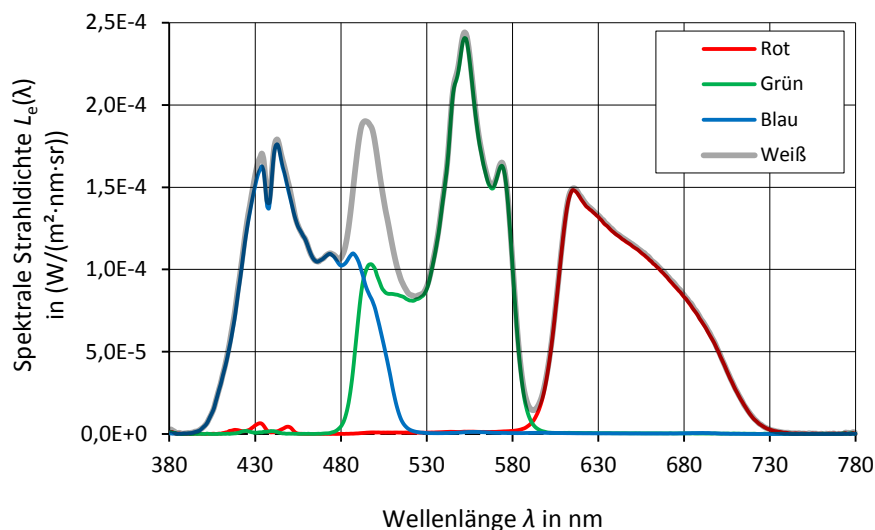


Abbildung 6.5: Absolute spektrale Strahldichte $L_e(\lambda)$ der einzelnen Kanäle des Projektors

6.3 Kalibrierung der Farbfilter

Die lichttechnische Charakterisierung der verwendeten Interferenzfilter bildet nach der geometrischen Kalibrierung und der Kalibrierung des Projektors den dritten Schritt. Für die messtechnische Erfassung dient dieselbe Messanordnung wie in Abschnitt 6.2 (S. 51) beschrieben. Während der Projektor auf die maximale Helligkeit eingestellt ist, werden die Interferenzfilter über das Doppelfilterrada (vgl. Abschnitt 5.2, S. 40) nacheinander in den Strahlengang geschwenkt. Für jeden Filter wird das von der Projektionsfläche reflektierte Spektrum gemessen. Abbildung 6.6a zeigt die so gemessene-

nen Werte der absoluten spektralen Strahldichte $L_e(\lambda)$ der Spektren des Projektors sowie der 22 verwendeten Interferenzfilter. Bezieht man diese Absolutwerte der Interferenzfilter auf das Spektrum des Projektors als Referenz (100 %), so ergeben sich die spektralen Transmissionsgrade $\tau(\lambda)$ der einzelnen Filter in Abbildung 6.6b.

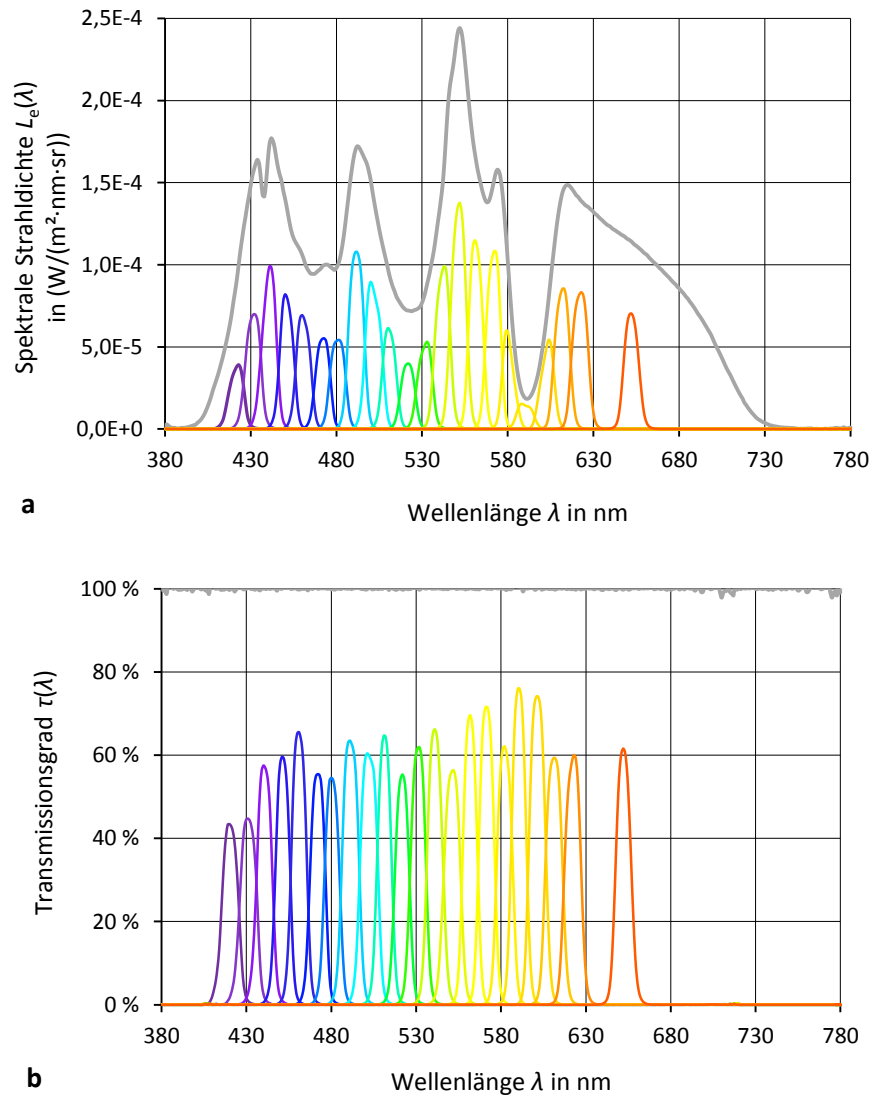


Abbildung 6.6: Spektrale Charakteristik der verwendeten Interferenzfilter
a) Absolute spektrale Strahldichte $L_e(\lambda)$ des Projektors/der Interferenzfilter
b) spektrale Transmissionsgrade $\tau(\lambda)$ des Projektors sowie der Filter in %

Der Filter mit dem geringsten Transmissionsgrad bei $\lambda = 420 \text{ nm}$ weist einen Wert von ca. 43 % auf. Der Filter bei $\lambda = 590 \text{ nm}$ weist mit 73 % die höchste Transmission auf. Im Gegensatz dazu beträgt der Transmissionsgrad des untersuchten LCTF bei $\lambda = 420 \text{ nm}$ lediglich ca. 3 % (vgl. Abbildung 5.3 auf S. 41). Für Wellenlängen unterhalb von $\lambda = 410 \text{ nm}$ und oberhalb von $\lambda = 720 \text{ nm}$ tritt ein deutliches Rauschen in den Messdaten auf. Dies ist dadurch zu begründen, dass der Projektor in diesen Wellenlängenbereichen kein ausreichendes Signal mehr liefert. Für die weiteren Betrachtungen im Verlaufe dieser Arbeit werden diese Bereiche nicht weiter berücksichtigt. Die ermittelten Transmis-

sionsspektren werden in einer Kalibrierdatei abgespeichert und werden zur Durchführung der Versuche in der Ablaufsteuerung wieder geladen. Tabelle 6.2 zeigt die wesentlichen spektralen Eigenschaften aller Filter in einer Übersicht.

Tabelle 6.2: Übersicht der verwendeten Farbfilter und deren spektrale Eigenschaften

Nr.	$\lambda_s^{1)}$ in nm	$\lambda_{\text{HWB}}^{2)}$ in nm	$\Delta\lambda^{3)}$ in nm	Nr.	$\lambda_s^{1)}$ in nm	$\lambda_{\text{HWB}}^{2)}$ in nm	$\Delta\lambda^{3)}$ in nm
1	421,9	10,00	9,6	12	531,7	9,43	10,3
2	431,5	10,27	9,2	13	542,0	9,48	9,2
3	440,7	9,60	10,3	14	551,2	10,05	10,1
4	451,0	8,92	9,8	15	561,3	8,76	10,3
5	460,8	9,38	11,3	16	571,6	9,11	8,7
6	472,1	9,30	8,8	17	580,3	9,41	9
7	480,9	9,57	10,7	18	589,3	9,60	13,6
8	491,6	10,13	10	19	602,9	9,83	8,7
9	501,6	10,96	9,2	20	611,6	10,32	10,4
10	510,8	8,66	10,9	21	622,0	10,16	29,9
11	521,7	9,01	10	22	651,9	9,41	-

¹⁾ Schwerpunktwellenlänge

²⁾ Halbwertsbreite (FWHM)

³⁾ Schrittweite zum nächsten Filter

6.4 Kalibrierung der Hintergrund-Beleuchtung

Die Charakterisierung der LEDs der Hintergrund-Beleuchtung, die das Adaptationsspektrum bildet, ist der zeitlich aufwändigste Schritt der Kalibrierungen. Abbildung 6.7 zeigt in einer Übersicht die auf der Projektionsfläche mit dem Spektroradiometer gemessenen Verläufe der absoluten spektralen Strahldichte $L_e(\lambda)$ der einzelnen LED-Kanäle. Während im kurzwelligen Bereich (blau) eine große Auswahl an LED-Wellenlängen zur Verfügung steht, so ist die Auswahl im langwelligen Bereich (rot) schon deutlich schlechter. Im gelb-grünen Bereich um 580 nm stehen keine entsprechenden LEDs zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde eine leistungsstarke weiße LED verwendet, bei der der Anteil des blauen Chips herausgefiltert wurde. Übrig bleibt nur noch der durch den Leuchtstoff konvertierte Anteil der Strahlung.

Unter Verwendung der Messanordnung in Abschnitt 6.2 (S. 51) wird für jeden der 23 verwendeten LED-Kanäle der Strom in vorher definierten Schrittweiten variiert. Auf die Nutzung der Pulsweitenmodulation wurde aufgrund möglicher störender Einflüsse der Betriebsfrequenz verzichtet. Für jedes Stromniveau wird bei aktivierter Temperierung (vgl. Abschnitt 5.6, S. 46) die auf der Projektionsfläche erzeugte absolute Strahldichte anhand des Spektroradiometers gemessen.

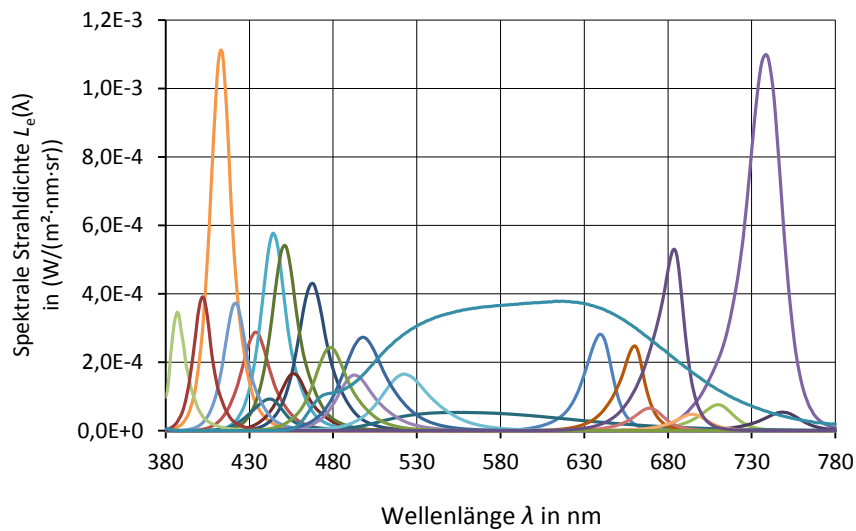


Abbildung 6.7: Spektrale Strahldichte $L_e(\lambda)$ der 23 LED-Kanäle der Hintergrund-Beleuchtung

So ergibt sich für jeden LED-Kanal eine individuelle Kennlinie. Für die Charakterisierung der Kennlinien wurde ein Abstand von 50 Codewert-Schritten bei einer Auflösung von 4096 Schritten (12 bit) verwendet. Abbildung 6.8 zeigt die ermittelten Kennlinien für sechs ausgewählte LED-Kanäle.

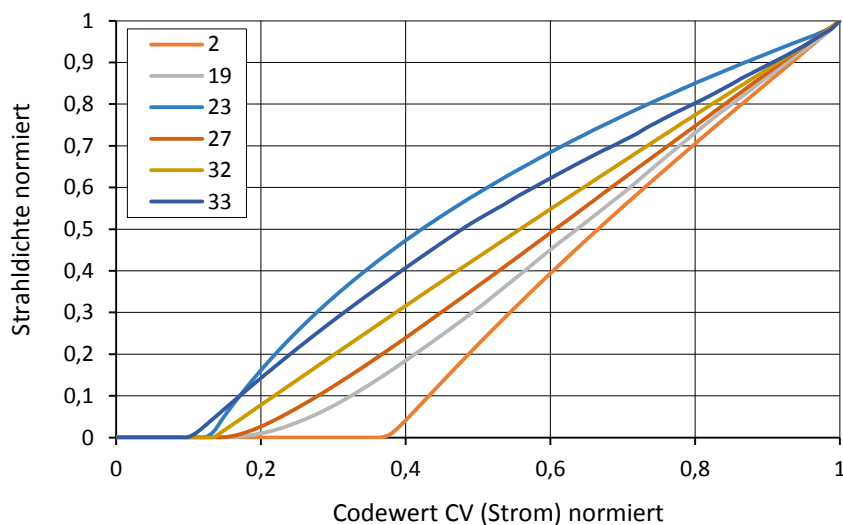


Abbildung 6.8: Ermittelte Kennlinien für sechs ausgewählte LED-Kanäle der Hintergrund-Beleuchtung

Die Kanalnummern wurden hierbei frei vergeben und sind nicht alle belegt. Es ist zu erkennen, dass aufgrund der stark unterschiedlichen Verläufe der Kennlinien in Bezug auf die Linearität und den Offset-Strom eine individuelle Charakterisierung jedes LED-Kanals erforderlich ist. Die ermittelten Kalibrierdaten werden in einer Datei gespeichert und stehen damit für die spätere Verwendung in der Ablaufsteuerung der Versuche zur Verfügung.

6.5 Kalibrierung der Hintergrund-Filter

Zur Kalibrierung der in Abschnitt 5.7 (S. 47) beschriebenen Filterfolien werden diese im Versuchsaufbau in ihrer spektralen Transmission charakterisiert. Unter Verwendung der Messanordnung in Abschnitt 6.2 (S. 50) wird die LED-Hintergrund-Beleuchtung auf maximale Helligkeit eingestellt. Anschließend wird an dem Punkt, an dem im Versuchsablauf das zu detektierende Objekt erscheinen soll, die spektrale Strahldichte gemessen. Dieser Wert entspricht 100 %. Nun wird eine Filterfolie vor den LEDs der Hintergrund-Beleuchtung angebracht, um die spektrale Strahldichte unter dieser Bedingung erneut zu messen. Dividiert man beide gemessenen Werte durcheinander, so ergibt sich der spektrale Transmissionsgrad der Filterfolie nach Gleichung 6.2.

$$\tau(\lambda) = \frac{L_e(\lambda)_{\text{mit Filter}}}{L_e(\lambda)_{\text{ohne Filter}}} \quad \text{Spektraler Transmissionsgrad der Filterfolie} \quad 6.2$$

Dieser Vorgang wird für alle verwendeten Filterfolien und deren Kombinationen wiederholt. Abbildung 6.9 zeigt den spektralen Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ der gedruckten Filterfolien. Im Vergleich zu den Filterfolien in Abbildung 5.10 (S. 48) ist ein deutlich gleichmäßigerer spektraler Transmissionsverlauf zu erkennen, der in weiten Teilen nahezu linear ist.

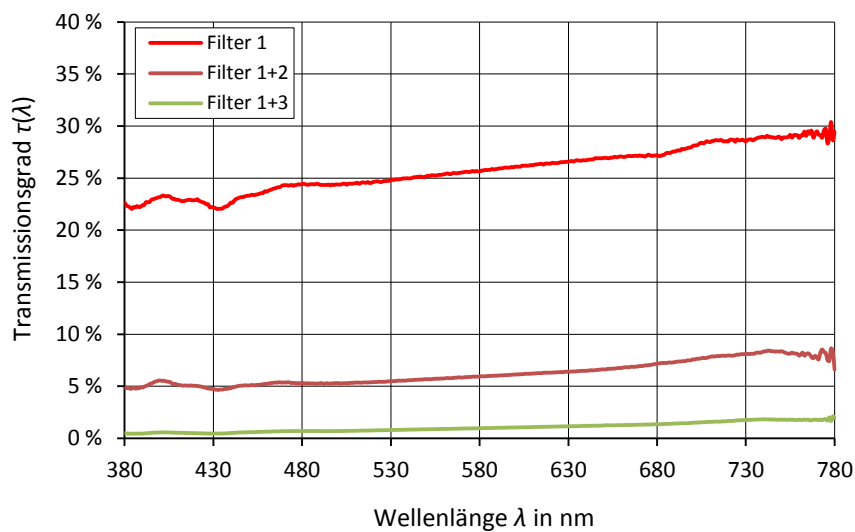


Abbildung 6.9: Spektraler Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ der selbst gedruckten Filterfolien

Für die Untersuchungen wurden die Filterkombinationen Filter 1+2 für die hohe Adaptationsleuchtdichte von $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ und Filter 1+3 für die niedrige Adaptationsleuchtdichte von $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ verwendet. Die so erzeugten Kalibrierdaten für die Filterfolien werden in einer separaten Datei gespeichert und werden für die Versuchsdurchführung wieder geladen.

6.6 Anbindung an die Literatur

Vor Beginn der durchgeführten Messreihen wurde die Kalibrierung des Versuchsstandes überprüft. Um eine Anbindung der Messergebnisse an die Literatur gewährleisten zu können, wurde mit zwei Testpersonen in einem Vortest die spektrale Empfindlichkeitsfunktion $V'(\lambda)$ der Stäbchen (vgl. Abschnitt 2.1.6, S. 14) im Bereich zwischen $\lambda = 450$ -560 nm ermittelt. Zu diesem Zweck musste sichergestellt werden, dass die Testpersonen annähernd vollständig dunkeladaptiert sind. Es wurde eine Adaptationszeit von $t_a = 30$ Minuten gewählt (vgl. Abschnitt 2.1.3, S. 10). Um den Projektor von seinem Arbeitspunkt besser anzupassen, wurde zusätzlich zu den Interferenzfiltern ein Graufilter (ND-Filter) in den Strahlengang eingebracht. Dieser dämpft die Transmission spektral nahezu aseptiv auf etwa 1 %.

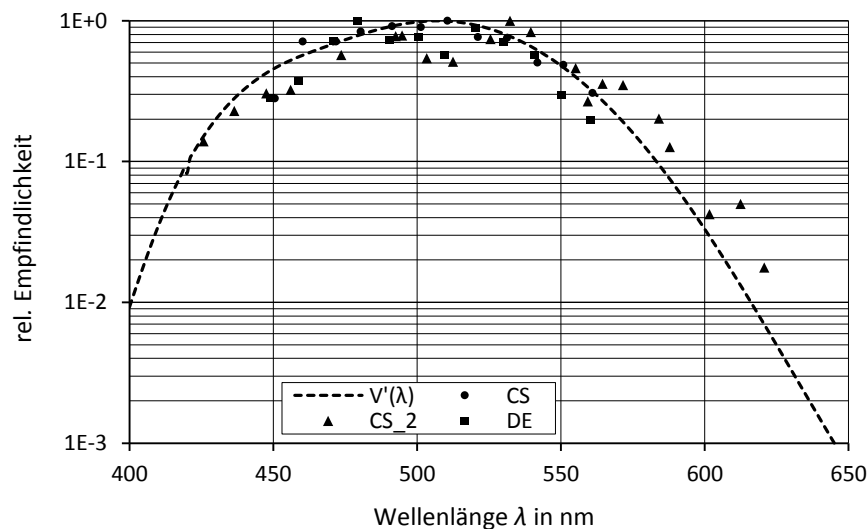


Abbildung 6.10: Überprüfung der Kalibrierung und Anbindung an die Literatur
Ermittlung von $V'(\lambda)$ mit 2 Testpersonen im Bereich von 420-620 nm

Zu einem späteren Zeitpunkt wurde dieser Test mit Testperson CS erneut in dem größeren Bereich zwischen $\lambda = 420$ -620 nm wiederholt. Abbildung 6.10 zeigt, dass alle Messwerte sehr dicht um die $V'(\lambda)$ -Funktion streuen. Die höheren Werte an den Spektralenden sind durch die Methode der Schwellenermittlung begründbar (vgl. HARTGE 1990 [74]).

7 Parameter, Methodik und Versuchsdurchführung

Im Folgenden werden die ausgewählten Parameter, die angewendete Methodik, die Vorgehensweise bei der Durchführung der Versuche sowie das ausgewählte Probandenkollektiv näher beschrieben.

7.1 Auswahl der Versuchsparameter

Die Situationen, in denen das visuelle System des Menschen im mesopischen Bereich (vgl. Abschnitt 2.1.3, S. 10) arbeitet, sind vielfältig. Bei der Auslegung des Versuchssetups im Labor wurde deshalb Wert darauf gelegt, dem breiten Anwendungsfeld im mesopischen Bereich Rechnung zu tragen. Wichtige Parameter wie die Adaptationsleuchtdichte, die Objektform und -farbe sowie der Seh- und Beobachtungswinkel sind flexibel einstellbar. Je nach Anwendungsbedingung ermöglicht das die vielseitige Verwendbarkeit des Versuchsaufbaus durch das Abbilden von Situationen aus dem Alltag. Neben der stationären Straßenbeleuchtung ist die Kraftfahrzeuglichttechnik ein wichtiges und sich sehr dynamisch entwickelndes Anwendungsgebiet im mesopischen Bereich Sehens. Sie bildet die hauptsächliche Motivation für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen im Labor. Vor diesem Hintergrund wurden die nachfolgend beschriebenen Parameter ausgewählt.

7.1.1 Adaptationsleuchtdichte L_U

Die für die Adaptation maßgebliche Leuchtdichte L_U wird im Versuchsaufbau durch die LED-Hintergrund-Beleuchtung (vgl. Abschnitt 5.6, S. 46 und Abschnitt 6.4, S. 55) auf der Projektionsfläche erzeugt. Wie bereits in Abschnitt 2.1.3 (S. 10) beschrieben, werden die Randbereiche des mesopischen Bereichs in der Literatur unterschiedlich definiert.

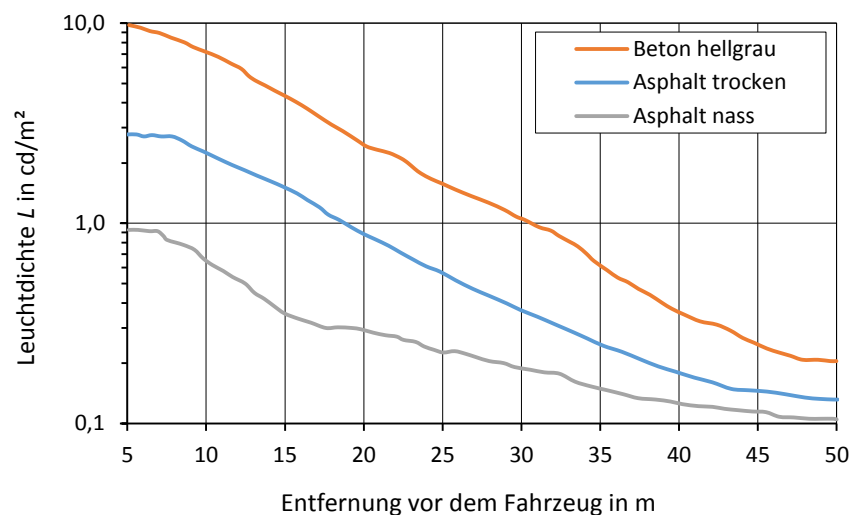


Abbildung 7.1: Verlauf der Leuchtdichte vor dem Fahrzeug für verschiedene Fahrbahnoberflächen nach SCHMIDT-CLAUSEN & FREIDING 2004 [150]

Die am weitesten gefassten Grenzen liegen bei einer Leuchtdichte zwischen $L_U = 0,001 \text{ cd/m}^2$ und 10 cd/m^2 . Betrachtet man die Leuchtdichte auf der Fahrbahn im Vorfeld eines Kraftfahrzeuges, so ergibt sich in Abhängigkeit der Entfernung nach SCHMIDT-CLAUSEN & FREIDING 2004 [150] die Darstellung in Abbildung 7.1.

Die Messungen wurden aus der Perspektive eines Autofahrers auf zwei unterschiedlichen Fahrbahnoberflächen durchgeführt. Das aktivierte Abblendlicht des verwendeten Fahrzeugs wurde anhand von Scheinwerfern mit Entladungslampen erzeugt. Während der hellgraue Beton im Neuzustand den bestmöglichen Fall widerspiegelt, stellt der dunkle Asphalt im nassen Zustand die ungünstigsten Bedingungen dar. Für die in Deutschland am häufigsten vorkommende Fahrbahnoberfläche Asphalt ist im trockenen Zustand eine Leuchtdichte von fast 3 cd/m^2 in einem Abstand von 5 m vor dem Fahrzeug vorhanden. In der größten betrachteten Entfernung von 50 m ist nur noch eine Leuchtdichte von $0,15 \text{ cd/m}^2$ vorhanden.

Die folgenden Überlegungen dienen dazu, den für die Untersuchungen relevanten Leuchtdichtebereich sinnvoll einzugrenzen. Betrachtet man typische Situationen im Straßenverkehr, so können zur Festlegung der Untersuchungsparameter die gefahrenen Geschwindigkeiten sowie die Umgebungsbedingungen innerhalb einer Stadt und auf einer Landstraße als Schwerpunkte gegenübergestellt werden. Abbildung 7.2 zeigt für ausgewählte Städte in Europa die Durchschnittsgeschwindigkeit im Straßenverkehr im Jahr 2008. Diese liegt in Berlin bei 24 km/h und in München bei 32 km/h . Bildet man in erster Näherung den Mittelwert für alle aufgeführten Städte in Abbildung 7.2, so ergibt sich eine durchschnittliche Geschwindigkeit von $30,13 \text{ km/h}$.

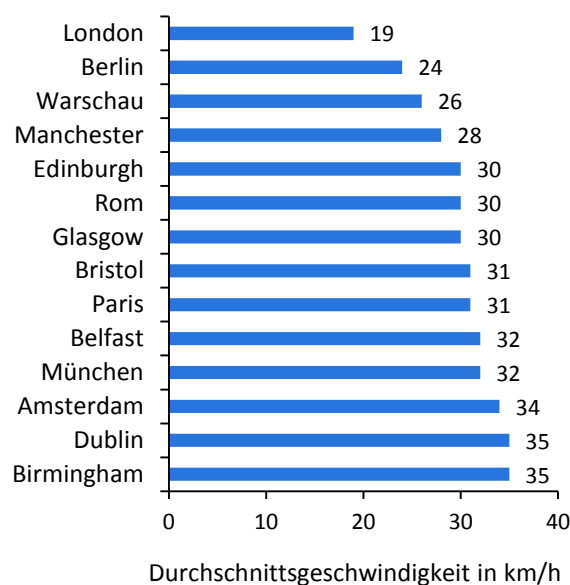


Abbildung 7.2: Durchschnittsgeschwindigkeit im Straßenverkehr in ausgewählten Städten Europas (ITIS HOLDINGS 2008 [85])

Im Stadtverkehr tauchen relevante Objekte typischerweise in kurzer Distanz zum Fahrzeug auf. Bestimmt man für die ermittelte Geschwindigkeit den Anhalteweg nach der „Faustformel“ in Gleichung 7.1 (BURGMANN et al. 2005 [21]), so ergibt sich ein Wert von $s_a = 18,11 \text{ m}$.

$$s_a = s_r + s_b = \left(\frac{v}{10} \cdot 3\right) \frac{h}{\text{km}} \cdot \text{m} + \left(\frac{v}{10} \cdot \frac{v}{10}\right) \frac{h^2}{\text{km}^2} \cdot \text{m} \quad \text{Anhalteweg} \quad 7.1$$

mit:

s_a Anhalteweg
 s_r Reaktionsweg
 s_b Bremsweg
 v Geschwindigkeit in km/h

Das bedeutet: im innerstädtischen Verkehr braucht ein Autofahrer bei einer Geschwindigkeit von etwa $v = 30 \text{ km/h}$ einen Anhalteweg von $s_a = 18,11 \text{ m}$, wenn er ein Objekt wahrnimmt und den Bremsvorgang einleitet. Nach Abbildung 7.1 ist in dieser Entfernung im Umfeld eine durch die eigenen Scheinwerfer erzeugte Leuchtdichte von ca. $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ auf der Fahrbahnoberfläche zu erwarten. Dieser Wert wird als oberer Grenzwert für die Adaptationsleuchtdichte der Laboruntersuchungen festgelegt. Zusätzliche Leuchtdichteanteile, die durch die insbesondere innerstädtisch vorhandene stationäre Straßenbeleuchtung entstehen, werden bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

Auf einspurigen Straßen außerorts stellt sich die Situation anders dar. Einerseits ist hier in der Regel keine stationäre Straßenbeleuchtung vorhanden, so dass nur die fahrzeugeigene Beleuchtung zur Adaptation beiträgt. Andererseits ist die gefahrene Durchschnittsgeschwindigkeit höher. Je nach Topologie und Umgebungsbedingungen kann diese variieren. VOIGT 2004 [172] nimmt einen mittleren Wert von $v = 60 \text{ km/h}$ an. Überwiegend wird jedoch von $v = 70 \text{ km/h}$ ausgegangen (VAHRENKAMP & MATTFELD 2014 [167], MÖSGEN 2008 [127]).

Für eine durchschnittliche Geschwindigkeit von $v = 70 \text{ km/h}$ ergibt sich nach Gleichung 7.1 ein Anhalteweg von $s_a = 70 \text{ m}$. Das Einleiten des Bremsvorganges setzt im nächtlichen Straßenverkehr allerdings voraus, dass in diesem Abstand ein Objekt durch die Beleuchtung der Scheinwerfer ausreichend gut detektiert werden kann. Diese Voraussetzung ist bei Abblendlicht nach eigenen Untersuchungen nur für technisch und optisch hochqualitative Scheinwerfersysteme mit Entladungslampen möglich. Die getesteten Scheinwerfer mit Halogenglühlampen haben diese Bedingung nicht erfüllt (vgl. SCHILLER et al. 2009 [147]). Da in Abbildung 7.1 nur die Entfernung bis 50 m vor dem Fahrzeug betrachtet wird, lässt sich die durch die Scheinwerfer erzeugte Leuchtdichte für den Abstand von 70 m nicht exakt ermitteln. Die Grafik selbst macht jedoch deutlich, dass sich die Leuchtdichte in einer Entfernung von mehr als 50 m Abstand asymptotisch dem Wert von $0,1 \text{ cd/m}^2$ annähert. Die Aktivierung des Fernlichtes würde diesen Wert zwar erhöhen. Nach einer Untersuchung von SPRUTE 2012 [155] nutzten die Versuchsteilnehmer aber auf ca. 40 % der gefahrenen Strecke lediglich das Abblendlicht, obwohl das Einschalten des Fernlichtes die Sicht verbessert hätte. Aus diesem Grund wird der Wert von $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ als unterer ungünstigster Grenzwert für die Adaptationsleuchtdichte der Laboruntersuchungen festgelegt.

7.1.2 Adaptationsspektrum

Bei Kfz-Scheinwerfern weisen Halogenglühlampen in unterschiedlicher Ausprägungsform den größten Marktanteil unter den verwendeten Lichtquellen auf. Entladungslampen, umgangssprachlich

auch „Xenon“-Lampen genannt, wurden 1991 in den Markt eingeführt. Sie zeigen sowohl für Labor- tests, als auch in der Praxis deutliche Vorteile für die visuelle Wahrnehmung auf (vgl. BODROGI et al. 2009 [12], SCHILLER et al. 2010 [146], SCHILLER et al. 2009 [147]). Indirekt lässt sich daraus auch ein Sicherheitsgewinn ableiten. Der Marktanteil im Fahrzeugbestand in Deutschland wird für das Jahr 2007 mit 6 % angegeben (DAT 2008 [39]). Da 2007 der erste LED-Scheinwerfer vorgestellt wurde (Marktanteil $\approx 0\%$), kann der Marktanteil der Halogenlampen für dieses Jahr mit ca. 94 % beziffert werden. Der Marktanteil von Entladungslampen zeigt mit 21 % für das Jahr 2014 (DAT 2014 [40]) ein deutliches Wachstum. Abbildung 7.3 zeigt die Entwicklung der Ausstattungsrate der Fahrzeuge in Deutschland, die Frontscheinwerfer mit Entladungslampen eingebaut haben.

Dieses Wachstum wird in Zukunft jedoch stagnieren und der noch jungen LED-Technologie weichen. Diese liegt derzeit noch im mittleren einstelligen Prozentbereich (LOREK 2014 [115]). Bis 2020 soll sie aber einen weltweiten Anteil von mehr als 20 % erreichen (vgl. BAUMGARTNER et al. 2012 [8]). Aus dieser Betrachtung ergeben sich spektrale Verteilungen von drei Lichtquellen, die im Bereich der Frontscheinwerfer von Bedeutung sind – Halogenglühlampen, Entladungslampen und LEDs.

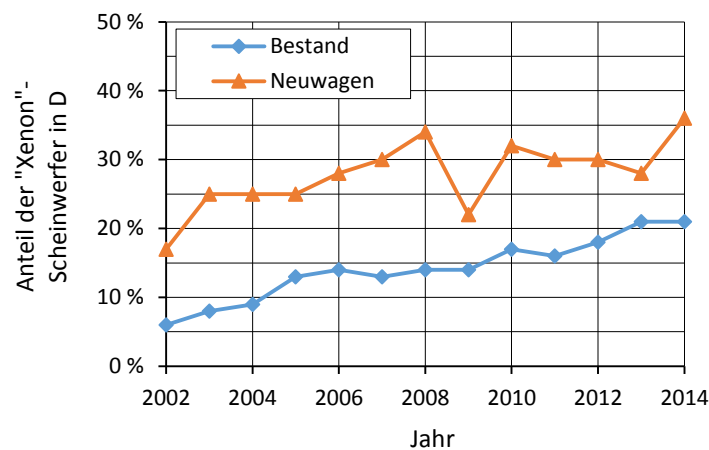


Abbildung 7.3: Ausstattungsgrad der Fahrzeuge mit „Xenon“-Scheinwerfern (Deutschland) für den Fahrzeugbestand und Neuzulassungen (Daten: DAT 2003-2015 [38])

Um den Einfluss des Adaptationsspektrums auf die Detektion von Objekten im Verkehrsgeschehen untersuchen zu können, sollen typische Spektren verwendet werden. Diese werden mit der LED-Hintergrund-Beleuchtung (vgl. Abschnitt 5.6, S. 46) erzeugt bzw. nachgebildet. Unter Vorgabe eines beliebigen Zielspektrums nutzt eine Optimierungssoftware, nachfolgend „Optimierer“ genannt, die bekannten Spektren der verwendeten LEDs der Hintergrund-Beleuchtung. Über diese wird eine bestmögliche Anpassung an das Zielspektrum vorgenommen.

Bei der LED-Hintergrund-Beleuchtung des Versuchsaufbaus sind die Spektren der LEDs für die Optimierung technologisch limitiert. Einerseits ist nicht für jede gewünschte Wellenlänge im sichtbaren Bereich auch eine entsprechende LED verfügbar. Andererseits weisen LEDs eine Halbwertsbreite von mehreren Nanometern auf (vgl. Abbildung 6.7, S. 56), die nicht unterschritten werden kann. Deshalb ist es nur begrenzt möglich, Spektren mit schmalen Peaks, wie beispielsweise von Entladungslampen, nachzubilden. Da das Ziel der Untersuchungen der grundlegende Einfluss des Adaptationsspektrums auf die Detektion ist, wurde darauf verzichtet, die exakten Spektren der Kfz-Lichtquellen

zu verwenden. Eine Möglichkeit, den Versuchsaufbau dahingehend zu erweitern, ist jedoch bereits über einen zweiten DLP-Projektor mit austauschbarer Lichtquelle vorgesehen.

Um den unterschiedlichen spektralen Verteilungen der drei Kfz-Lichtquellen dennoch grundsätzlich Rechnung zu tragen, wurden als Vorgabe (Ziel) für die Optimierung die Spektren in Tabelle 7.1 verwendet.

Tabelle 7.1: Ziel-Spektren für die Laboruntersuchungen (Vorgaben für den Optimierer)

Nr.	Bezeichnung Ziel-Spektrum	Ähnlichste Farbtemperatur CCT in K	Eigenschaft	Kurzbezeichnung in dieser Arbeit
1	Halogenglühlampe	2700	hoher Rotanteil	HAL
2	Normlichtart D65	6500	hoher Blauanteil	D65
3	Isoenerget. Spektrum ¹⁾	5454	alle Anteile gleich	ISO
4	LED-Spektrum ²⁾	5200	neutralweiß	LED

¹⁾ entspricht Normlichtart E; CCT als Richtwert

²⁾ Reales Spektrum einer einzelnen LED; Alle anderen Spektren werden mit mehreren LEDs nachgebildet (gemischt)

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die angegebenen Kurzbezeichnungen der Spektren in Tabelle 7.1 verwendet, auch wenn sie nur näherungsweise den vorgegebenen Ziel-Spektren entsprechen (vgl. Abbildung 7.4). Als Spektrum mit einem hohen Anteil im langwelligen Bereich wurde das Ziel-Spektrum einer Halogenglühlampe mit CCT = 2700 K (HAL) verwendet. Demgegenüber steht ein Spektrum mit erhöhtem kurzwelligem Blauanteil – D65. Das Spektrum D65 ist eine von der CIE definierte Normlichtart, die näherungsweise das Tageslicht repräsentiert (CIE S005/E-1998 [31]).

Eine weitere Sonderform ist das isoenergetische Spektrum (Normlichtart E) – ISO. Jede Wellenlänge weist hier die gleiche Strahldichte auf, so dass sich im sichtbaren Bereich ein Rechteckspektrum ergibt. Für D65 und ISO existieren keine realen Lichtquellen. Mit hohem technischem Aufwand lässt sich das D65-Spektrum jedoch näherungsweise nachbilden. Die Normlichtart E ist hingegen ein rein theoretisches Spektrum. Es dient hier dem Zweck, die Rezeptoren der Netzhaut durch eine identische Strahldichte auf einen nahezu gleichen Arbeitspunkt einzustellen. Das vierte Spektrum – LED – muss im Gegensatz zu den Spektren Nr. 1 – 3 nicht aus mehreren LED-Kanälen der Hintergrundbeleuchtung gemischt werden. Es wird von einem einzigen LED-Typ erzeugt.

Abbildung 7.4a zeigt den Verlauf der absoluten Strahldichte $L_e(\lambda)$ der vier Ziel-Spektren aus Tabelle 7.1. Dargestellt wird der sichtbare Bereich zwischen 380 - 780 nm am Beispiel der vorgegebenen Adaptationsleuchtdichte $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$. Abbildung 7.4b bis Abbildung 7.4d zeigen jeweils den Vergleich zwischen Ziel-Spektrum und dem daran angepassten Spektrum des Optimierers in einer detaillierten Ansicht mit feinerer Achsenskalierung.

Das HAL- und das ISO-Spektrum wurden für alle durchgeführten Versuche verwendet. Die Spektren D65 und ISO weisen abschnittsweise einen relativ ähnlichen Verlauf auf. Für die Versuchsreihe mit dem Beobachtungswinkel $\theta = 10^\circ$ wurde deshalb statt D65 das Spektrum LED verwendet.

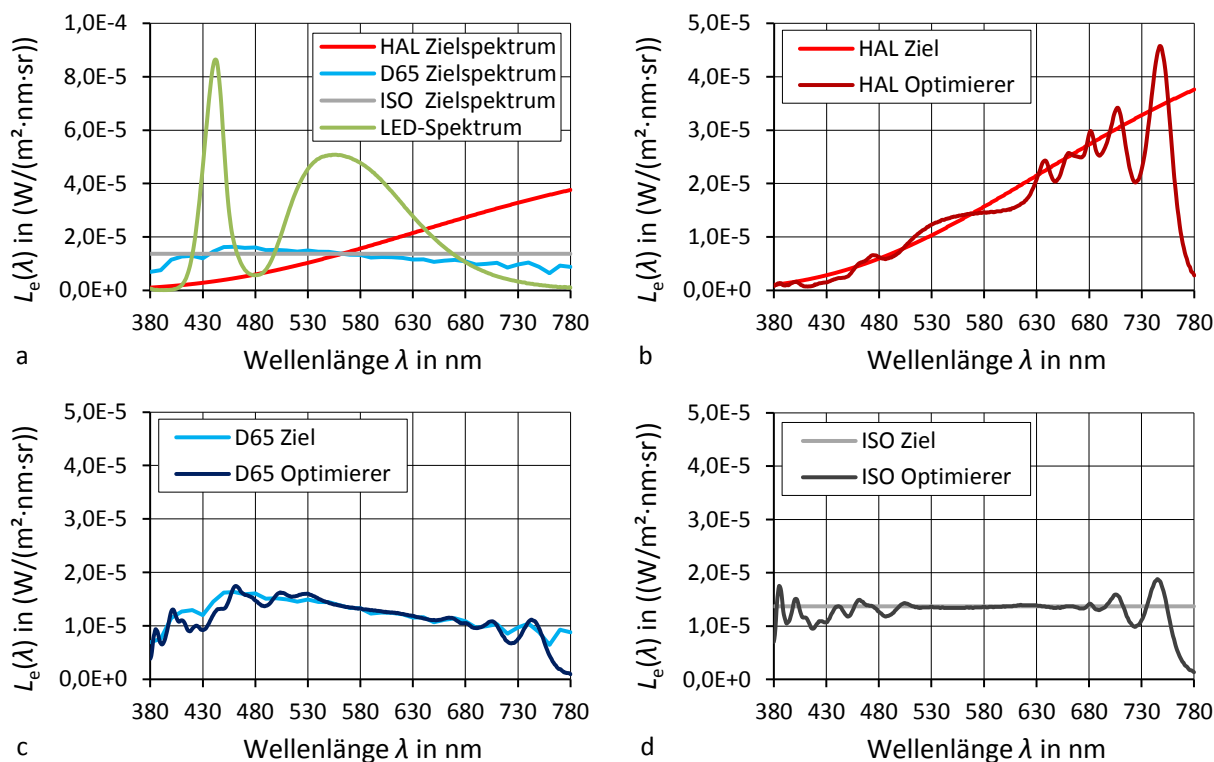


Abbildung 7.4: Spektren der LED-Hintergrund-Beleuchtung am Beispiel $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$
a) Vorgegebene Ziel-Spektren HAL, D65, ISO und LED für $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$
b) HAL-Spektrum des Optimierers im Vergleich zum Zielspektrum
c) D65-Spektrum des Optimierers im Vergleich zum Zielspektrum
d) ISO-Spektrum des Optimierers im Vergleich zum Zielspektrum

Die spektralen Verteilungen der LED-Hintergrund-Beleuchtung für $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ verlaufen analog zu den Kurven in Abbildung 7.4, jedoch mit niedrigeren absoluten spektralen Strahldichten.

Tabelle 7.2: Verwendete Ziel-Spektren in Abhängigkeit des Beobachtungswinkels θ

L_U in cd/m^2	$\theta = 2,65^\circ$	$\theta = 10^\circ$
0,1	HAL, D65, ISO	HAL, LED, ISO
1,0	HAL, D65, ISO	HAL, LED, ISO

Tabelle 7.2 zeigt die verwendeten Ziel-Spektren in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte L_U und des Beobachtungswinkels θ . Tabelle 7.3 zeigt in einer Übersicht die gemessenen lichttechnischen, farbmtrischen und strahlungsphysikalischen Größen der verwendeten Adaptationsspektren.

Tabelle 7.3: Farbmimetrische Daten der verwendeten Adaptationsspektren (Messwerte)

Bezeichnung ¹⁾	$\theta = 2,65^\circ$				$\theta = 10^\circ$			
	L_U ²⁾ in cd/m^2	L_{eU} ³⁾ in $\text{mW/m}^2\cdot\text{sr}$	CCT in K	Farbort U(x; y)	L_U ²⁾ in cd/m^2	L_{eU} ³⁾ in $\text{mW/m}^2\cdot\text{sr}$	CCT in K	Farbort U(x; y)
HAL 0,1	0,099	0,571	2822	0,4599 0,4267	0,099	0,565	2830	0,4592 0,4265
HAL 1	0,936	5,475	2958	0,4541 0,4337	0,982	5,415	2916	0,4562 0,4322
D65 0,1	0,098	0,470	6078	0,3205 0,3315	- ⁴⁾	- ⁴⁾	- ⁴⁾	- ⁴⁾
D65 1	1,004	4,752	6237	0,3173 0,3320	- ⁴⁾	- ⁴⁾	- ⁴⁾	- ⁴⁾
ISO 0,1	0,100	0,513	5019	0,3439 0,3442	0,099	0,503	5156	0,3406 0,3452
ISO 1	0,949	4,916	5246	0,3384 0,3452	1,008	5,121	5192	0,3455 0,3398
LED 0,1	0,1	- ⁴⁾	- ⁴⁾	- ⁴⁾	0,102	0,303	4968	0,3473 0,3668
LED 1	1	- ⁴⁾	- ⁴⁾	- ⁴⁾	1,003	3,030	5087	0,3433 0,3588

¹⁾ Kurzbezeichnung des Spektrums und der Zielleuchtdichte

²⁾ Leuchtdichte (gemessen)

³⁾ Strahldichte (gemessen)

⁴⁾ nicht verwendet

7.1.3 Schwerpunkt im sichtbaren Spektralbereich

Wie in Abbildung 2.5 (S. 10) bereits betrachtet, sind im kurzwelligen Bereich die S-Zapfen für die visuelle Wahrnehmung dominant. Sie weisen eine maximale Empfindlichkeit um etwa $\lambda = 440 \text{ nm}$ auf. Im langwelligen Bereich ist der Opponentkanal L-M dominant. Die maximale Empfindlichkeit dieses Kanals liegt bei ca. $\lambda = 607 \text{ nm}$. Unterhalb von $\lambda = 440 \text{ nm}$ und oberhalb von $\lambda = 607 \text{ nm}$ fällt die Empfindlichkeit des visuellen Systems stark ab. Aufgrund dieser spektralen Empfindlichkeiten ist es nicht zwingend erforderlich, den gesamten als sichtbar definierten Spektralbereich zwischen $\lambda = 380 - 780 \text{ nm}$ zu betrachten.

Es ist sinnvoll, sich auf den Kernbereich der Empfindlichkeit der relevanten Rezeptoren und Kanäle zu konzentrieren. Als Eingrenzung des untersuchten Spektralbereichs wurde für die relative Empfindlichkeit ein Wert von ca. 0,3 (vgl. Abbildung 2.5, S. 10) für sinnvoll erachtet. So ergibt sich ein Wellenlängenbereich zwischen etwa $\lambda = 420 - 650 \text{ nm}$. Dieser Bereich bildet den Schwerpunkt für die durchgeführten Untersuchungen. Das gilt insbesondere für die verwendeten Interferenzfilter zur Darstellung des Detektionsobjektes (vgl. Abschnitt 5.2, S. 40). Ebenso wurde in diesem Bereich besonderer Wert auf eine gute Anpassung des Hintergrundspektrums an das vorgegebene Zielspektrum gelegt. Die Schwerpunktwellenlängen der 22 verwendeten Interferenzfilter zeigt Tabelle 7.5 auf S. 70. Weitere Informationen zu den spektralen Eigenschaften der verwendeten Filter sind in Tabelle 6.2 (S. 55) zu finden.

7.1.4 Sehwinkel α und verwendete Objektform

Der Sehwinkel α beschreibt die Ausdehnung eines dargestellten Detektionsobjektes auf der Projektionsfläche aus der Perspektive der Testperson. Die Sehwinkel und die Form der dargebotenen Objekte lassen sich durch den Projektor frei einstellen. Um eine Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse mit den Empfindlichkeitsfunktionen des Standardnormalbeobachters der CIE (vgl. Abschnitt 2.1.6, S. 14) und weiteren Untersuchungen (vgl. BODROGI et al. 2003 [13], KURTENBACH et al. 1999 [105], FREIDING 2010 [54], SZALMAS et al. 2005 [165] u.a.) zu gewährleisten, wurde der Sehwinkel auf einen Wert von $\alpha = 2^\circ$ festgelegt.

In Anlehnung an die Untersuchungen von HAMM 1997 [73], FREIDING 2010 [54] u.a. wurde als Objektform ein gefüllter Kreis festgelegt. Die Möglichkeit den Sehwinkel und die Objektform bei nachfolgenden Untersuchungen in ihrer Ausprägung zu verändern, ist bereits gegeben.

7.1.5 Beobachtungswinkel θ

Der Beobachtungswinkel θ ist der Winkelabstand zwischen dem Mittelpunkt des dargestellten Objektes und dem Fixationspunkt, der mit der Sehachse übereinstimmt. So vielfältig und dynamisch wie das tägliche Verkehrsgeschehen ist, so kann auch der Beobachtungswinkel θ stark variieren, unter dem ein Objekt im Sichtfeld eines Autofahrers auftaucht. Für eine geeignete Auswahl von Beobachtungswinkeln kann an die vorangegangenen Überlegungen zur Adaptationsleuchtdichte angeknüpft werden (vgl. Abschnitt 7.1.1, S. 59). Wie bereits betrachtet, ist im innerstädtischen Verkehr bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von $v = 30$ km/h mit einem Anhalteweg von $s_a = 18,11$ m zu rechnen. Bei einer mittleren Geschwindigkeit von $v = 70$ km/h außerorts ergibt sich ein Wert von $s_a = 70$ m.

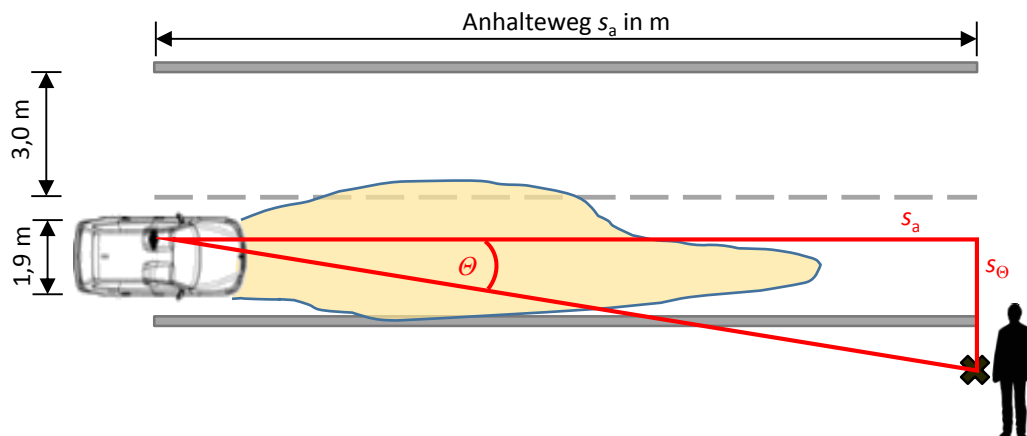


Abbildung 7.5: Schematische Darstellung zur Festlegung des Beobachtungswinkels θ

Abbildung 7.5 zeigt in schematischer Form einen Fußgänger, der im Abstand s_a etwa zwei Schritte (1,25 m) neben dem rechten Fahrbahnrand steht. Es wird angenommen, dass die Strecke s_a bei sofortigem Einleiten des Bremsvorganges ausreicht, um eine Kollision mit dem Fußgänger beim Betreten der Fahrbahn zu vermeiden. Setzt man eine Fahrstreifenbreite typischer Landstraßen nach dem Regelquerschnitt RQ 9,5 voraus, ergibt sich ohne die durchgehende Randmarkierung ein Wert von 3 m. Diese Fahrstreifenbreite ist auch für Nebenstraßen im städtischen Bereich eine sinnvolle Annahme, auch wenn die Werte hier stärker variieren können. Als Fahrzeugbreite wird ein Wert von 1,9 m angenommen. Die Sitzposition des Fahrers befindet sich seitlich versetzt etwa bei einem Viertel dieses Wertes bezogen auf die linke Fahrzeugseite. Das Fahrzeug fährt mittig auf dem Fahrstreifen.

Nach Gleichung 7.2 ergibt sich für die Situation auf der Landstraße mit $s_a = 70$ m ein Wert von $\theta = 2,64^\circ$. Um die Option einer Vergleichbarkeit mit den Blendungsuntersuchungen von ZYDEK et al. 2011 [188] zu ermöglichen, wurde der Wert auf $\theta = 2,65^\circ$ festgelegt.

$$\theta = \arctan \frac{s_\theta}{s_a} = \arctan \frac{\frac{3,0 \text{ m}}{2} + \frac{1,9 \text{ m}}{4} + 1,25 \text{ m}}{s_a} \quad 7.2$$

mit:

θ Beobachtungswinkel

s_θ seitlicher Abstand Fahrer zu Fußgänger (s. Abbildung 7.5)

s_a Anhalteweg

Für den städtischen Bereich ergibt sich entsprechend ein Wert von $\theta = 10^\circ$. Tabelle 7.4 zeigt zusammenfassend die für die Situation Stadt und Landstraße festgelegten Beobachtungswinkel.

Tabelle 7.4: Festgelegte Beobachtungswinkel θ

Situation	mittlere Geschwindigkeit v	Anhalteweg s_a	Beobachtungswinkel θ ¹⁾
Stadt	30 km/h	18,11 m	10°
Landstraße	70 km/h	70,00 m	2,65°

¹⁾ Eingrenzung: von der Sehachse aus rechts

Ein weiterer Grund, der für die Auswahl der beiden Beobachtungswinkel spricht, ist die Berücksichtigung der Verteilung der Rezeptoren auf der Netzhaut des Auges (vgl. Abbildung 2.3, S. 7). Vom zentralen Sehbereich, der Fovea, steigt die Dichte der Stäbchen mit einem hohen Gradienten sehr stark an. Die Dichte der Zapfen hingegen sinkt. Bei $\theta = 2,65^\circ$ beträgt das Verhältnis Stäbchen zu Zapfen etwa 2:1. Bei $\theta = 10^\circ$ entspricht das Verhältnis etwa 13:1. Durch diese beiden Extremwerte wird die Verteilung der Rezeptoren bei der Untersuchung mit berücksichtigt.

7.1.6 Darbietungszeit t_d und Pausenzeit t_p

Die Darbietungszeit t_d wird als Zeit definiert, in der ein Detektionsobjekt vom Projektor auf der Projektionsfläche dargestellt wird. Dabei ist es unerheblich, ob das Objekt für den Probanden in dieser

Zeit wahrnehmbar oder nicht wahrnehmbar ist. Während der Darbietungszeit hat der Proband die Aufgabe, den Fixationspunkt anzuschauen, damit das Objekt unter einem definierten Beobachtungswinkel erscheint. Eine zeitlich gut angepasste Abfolge von Darbietungszeit und Pausenzeit ist nicht nur aus physiologischer Sicht sinnvoll. KINGDOM, FREDERICK A. A. & PRINS 2010 [92] zeigen auf, dass auch der durch die Testperson empfundene Komfort einer Untersuchung davon stark beeinflusst wird.

Um eine geeignete Darbietungszeit festzulegen, ist ein Kompromiss erforderlich. Die Empfänger auf der Netzhaut reagieren überwiegend auf Veränderungen. Eine zu lange Darbietungszeit auf demselben Netzhautort führt zu einer Ermüdung der Rezeptoren und das dargestellte Objekt verschwindet allmählich [JOOS et al. 2003 [88]]. Taucht ein Objekt seitlich im Blickfeld auf, so kann dies unwillkürlich eine kurze Augenbewegung (Sakkade) auslösen [MIKASCH & HAACK 1986 [122]]. Diese Reaktion dient dazu, seitlich detektierte Objekte durch Blickzuwendung in den Punkt auf der Netzhaut mit der höchsten Sehschärfe (Fovea) zu bewegen (vgl. Abbildung 2.1, S. 5). Der gewünschte Beobachtungswinkel θ wäre damit jedoch nicht mehr gewährleistet. Es ist anzunehmen, dass die Neigung zur Blickzuwendung steigt, je länger ein Objekt seitlich dargestellt wird. Die Ausrichtung der Augen auf den Fixationspunkt muss demnach vom Probanden bewusst gesteuert, gehalten und korrigiert werden. Eine angemessen kurze Darbietungszeit ist unter diesem Gesichtspunkt von Vorteil.

Eine zu kurze Darbietungszeit reicht hingegen unter Umständen nicht dafür aus, dass der Proband die Augen zu Beginn der Darbietungszeit auf den Fixationspunkt ausrichtet hat, um das Objekt peripher unter dem richtigen Beobachtungswinkel detektieren zu können. Zudem sind kurze Darbietungszeiten von nur wenigen Millisekunden im alltäglichen Verkehrsgeschehen eher von untergeordneter Bedeutung.

Die Ergebnisse von HAMM 1997 [73] zeigen für den Beobachtungswinkel $\theta = 1^\circ$, dass sich die absoluten spektralen Empfindlichkeiten mit Darbietungszeiten von mehr als 0,191 s einander annähern. Unter der Annahme, dass dieses Verhalten auch für größere Beobachtungswinkel mit einer höheren Stäbchendichte gilt, sollte eine Darbietungszeit über diesem Wert gewählt werden. Die CIE 95 [30] empfiehlt eine Darbietungszeit von $t_d = 300$ ms. Nach Vorversuchen wurde der endgültige Wert der Darbietungszeit auf einen Wert von $t_d = 350$ ms festgelegt. Auf die Darbietungszeit folgt eine Pause von $t_p = 1000$ ms. Dies entspricht in etwa auch den Empfehlungen von KINGDOM, FREDERICK A. A. & PRINS 2010 [92]. Diese Autoren empfehlen zwar eine um 100 ms kürzere Darbietungszeit. Diese dient jedoch nur als grobe Empfehlung, so dass die hier gewählte Größe von $t_d = 350$ ms durchaus gestützt wird. Verwendet man die mittlere Geschwindigkeit von $v = 70$ km/h auf Landstraßen aus Tabelle 7.4, so entspricht dies 19,4 m/s. Nach Gleichung 7.1 (S. 61) ergibt sich ein Reaktionsweg von $s_r = 21$ m. Daraus errechnet sich eine Reaktionszeit von 1,08 s. Eine Pausenzeit von $t_p = 1000$ ms entspricht damit den Begebenheiten in der Praxis.

Innerhalb der 1350 ms von Beginn der Darbietungszeit bis zum Ende der Pausenzeit hat der Proband die Möglichkeit, eine Antwort über das Eingabegerät abzugeben. Dann erscheint das Objekt erneut mit einer anderen Intensität. Andere Autoren verwenden mit 0,7 s eine deutlich kürzere Zeit für die Probandenantwort (vgl. FRIEDBURG et al. 1998 [56]). In Vorversuchen hat sich eine derart kurze Reaktionsphase für die vorliegende Anwendung jedoch als wenig praktikabel erwiesen. Abbildung 7.6 zeigt den gewählten zeitlichen Verlauf von Darbietungszeit und Pausenzeit. FREIDING 2010 [54] konnte für die Signalform keinen Einfluss auf die spektrale Empfindlichkeit nachweisen (vgl. auch SCHILLER 2004 [145]). Als Pulsform wurde deshalb ein klassisches Rechtecksignal verwendet.

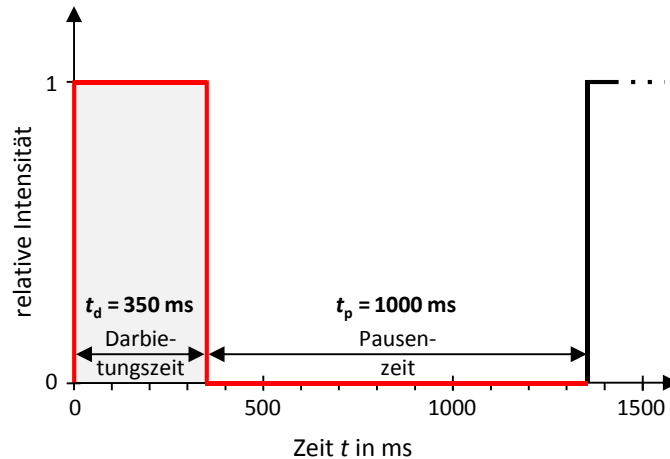


Abbildung 7.6: Zeitlicher Verlauf von Darbietungs- und Pausenzeit für ein Objekt mit maximaler Intensität (100 %)

7.1.7 Wiederholungen und Randomisierung

Da Schwellenwerte naturgemäß nicht beeinflussbaren intra- und interindividuellen Schwankungen unterliegen (vgl. Abschnitt 2.2.5, S. 24), empfiehlt es sich, jede Parameterkombination eines dargebotenen Objektes mehrfach zu wiederholen. GERDES 1979 [59] verwendet für seine Schwellenuntersuchungen drei Wiederholungen je Parameterkombination. Zur Überprüfung wurde ein eigener Versuch mit drei und zehn Wiederholungen durchgeführt. Abbildung 7.7 zeigt als Ergebnis den Vergleich der Mittelwerte und Standardabweichungen für die drei ausgewählten Wellenlängen $\lambda = 440 \text{ nm}$, 530 nm und 640 nm für eine Testperson.

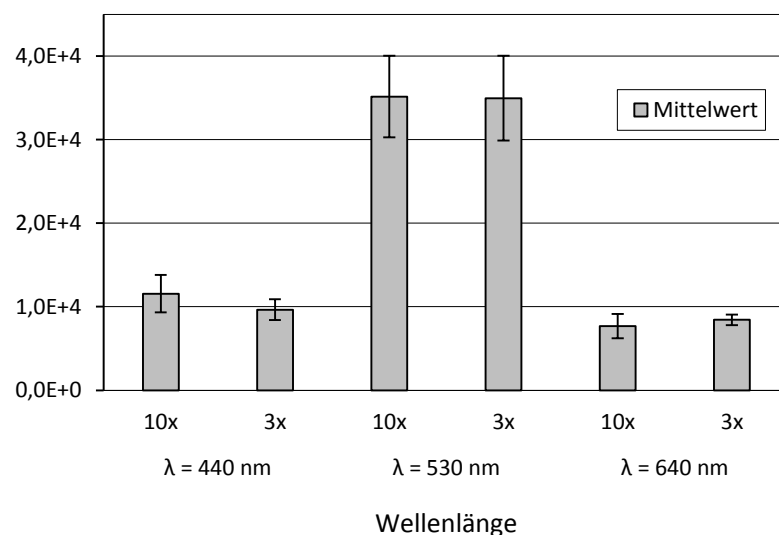


Abbildung 7.7: Einfluss der Anzahl der Wiederholungen je Parameterkombination für drei ausgewählte Wellenlängen bei einer Testperson

Während die Anzahl der Wiederholungen bei $\lambda = 530 \text{ nm}$ keinen erkennbaren Einfluss hat, erhöht sich im kurz- und langwelligen Bereich die Streuung der Messwerte mit zunehmender Anzahl der

Wiederholungen. Die Mittelwerte für drei durchgeführte Wiederholungen liegen dabei innerhalb der Standardabweichung für zehn Wiederholungen. Aus diesem Grund werden drei Wiederholungen als guter Kompromiss zwischen zeitlichem Aufwand je Messreihe und statistischer Aussagekraft ausgewählt. Um einen systematischen Einfluss durch nachlassende Konzentration der Testperson oder die Reihenfolge der Filter auf die gemessenen Schwellenwerte auszuschließen, werden die Wellenlängen (Interferenzfilter) in einer zufälligen Abfolge dargestellt. Die drei Wiederholungen je Filter erfolgten direkt nacheinander.

7.1.8 Adaptation

Um die zeitliche Anpassung des Auges an die Umfeldleuchtdichten zu gewährleisten, wird für $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ eine Dunkeladaptationsdauer von $t_a = 15 \text{ min}$ verwendet. Für $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ wurde eine Dauer von $t_a = 20 \text{ min}$ angesetzt. Diese Werte basieren auf praktischen Erfahrungen (vgl. GERDES 1979 [59]) und decken sich mit den Angaben aus Abschnitt 2.1.3 (S. 10).

7.1.9 Übersicht der ausgewählten Versuchsparameter

Tabelle 7.5 fasst die ausgewählten Versuchsparameter in einer Übersicht zusammen.

Tabelle 7.5: Ausgewählte Parameter für die durchgeführten Laboruntersuchungen

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Anzahl n	Auswahl
Leuchtdichte der Hintergrund-Beleuchtung (Adaptation)	L_U	cd/m^2	2	0,1; 1 ¹⁾
Spektrum der Hintergrundbeleuchtung (Adaptation)	-	-	4	HAL; D65; ISO; LED ¹⁾
Schwerpunktwellenlängen der Interferenzfilter im Bereich zwischen 420 - 650 nm	λ_s	nm	22	421,9 - 431,5 - 440,7 - 451,0 - 460,8 472,1 - 480,9 - 491,6 - 501,6 - 510,8 521,7 - 531,7 - 542,0 - 551,2 - 561,3 571,6 - 580,3 - 589,3 - 602,9 - 611,6 622,0 - 651,9
Objektform	-	-	1	gefüllter Kreis
Sehwinkel (Objektgröße) ²⁾	α	°	1	2
Beobachtungswinkel (seitlich) ²⁾	θ	°	2	2,65; 10
Darbietungszeit	t_d	ms	1	350
Pausenzeit	t_p	ms	1	1000
Wiederholungen	-	-	1	3
Reihenfolge der Filter	-	-	1	zufällig / randomisiert
Adaptationszeit	t_a	min	2	15; 20 ³⁾

¹⁾ vgl. Tabelle 7.3 (S. 65)

²⁾ beidäugige Betrachtung (binokular)

³⁾ 15 min. bei 1 cd/m^2 und 20 min. bei $0,1 \text{ cd/m}^2$

Abbildung 7.8 zeigt in einer schematischen Darstellung die Projektionsfläche mit Fixationspunkt und Objekt sowie den entsprechenden Winkelangaben.

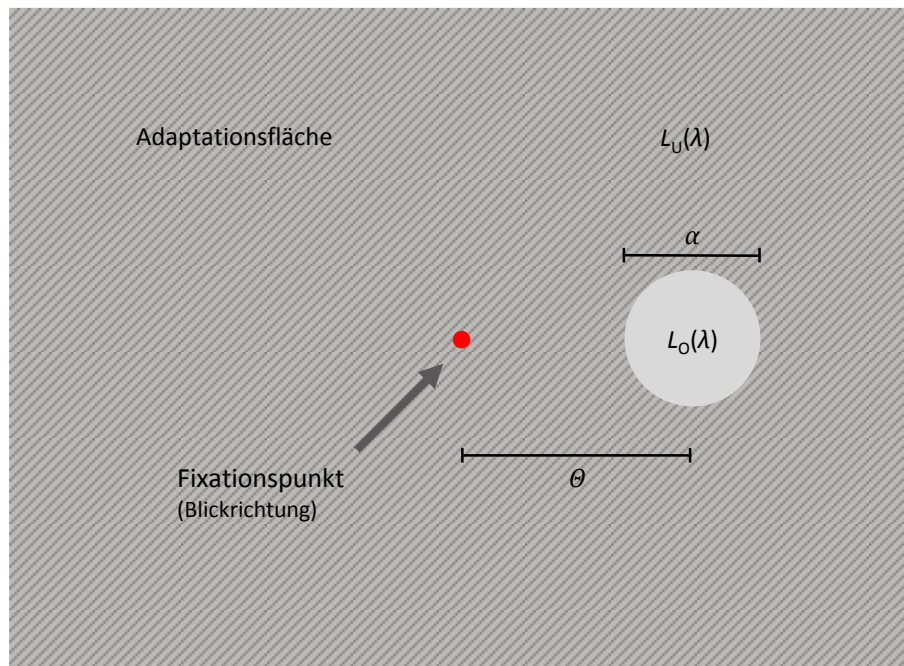


Abbildung 7.8: Schematische Darstellung der Projektionsfläche mit Fixation und Objekt
 $L_u(\lambda)$: spektrale Strahldichtevertelung des Adaptationsfeldes (Umfeld)
 $L_o(\lambda)$: spektrale Strahldichtevertelung des Objektes
 θ : Beobachtungswinkel
 α : Sehwinkel

7.2 Methodik der Versuchsdurchführung

Zur Bewertung des Detektionsvermögens in Abhängigkeit von den gewählten Versuchsparametern (vgl. Abschnitt 7.1) wird in der vorliegenden Arbeit die achromatische Wahrnehmungsschwelle als Unterschieds- bzw. Inkrementenschwelle verwendet (vgl. Abschnitt 2.2.2.1, S. 19). Das wahrzunehmende Objekt wird dabei auf einem beleuchteten Hintergrund dargestellt, der zugleich einen der zu untersuchenden Parameter darstellt. Maßgebliche Größe für die Wahrnehmung ist der Kontrast (vgl. Abschnitt 2.1.5, S. 13). Die Psychophysik stellt für die Ermittlung einer Schwelle verschiedene alternative Methoden zur Verfügung. Diese gewichten den Kompromiss zwischen Schnelligkeit und Genauigkeit unterschiedlich (vgl. Abschnitt 2.3, S. 24).

7.2.1 Adaptive Prozedur

Anstelle einer klassischen Methode wie der Grenzwert- und Einstellmethode oder der Methode der konstanten Stimuli wird in der vorliegenden Arbeit eine adaptive Methode – eine so genannte Stair-

case Prozedur - zur Ermittlung der Schwelle verwendet (vgl. Abschnitt 2.3.5, S. 27). Die aktuell dargestellte Reizintensität hängt dabei von der vorherigen Eingabe des Probanden ab. Daraus resultiert ein zeitlicher Vorteil bei der Ermittlung der Schwelle, weil die Intensitäten der Detektionsobjekte dynamisch angepasst werden. Sie nähern sich schneller der gesuchten Schwelle, um die ein Großteil der Werte dargestellt wird (vgl. KAERNBACH 2001 [90], KING-SMITH et al. 1994 [94], LEVITT 1971 [112]). Es werden eine doppelte bzw. zwei ineinander verschachtelte Staircase-Prozeduren verwendet.

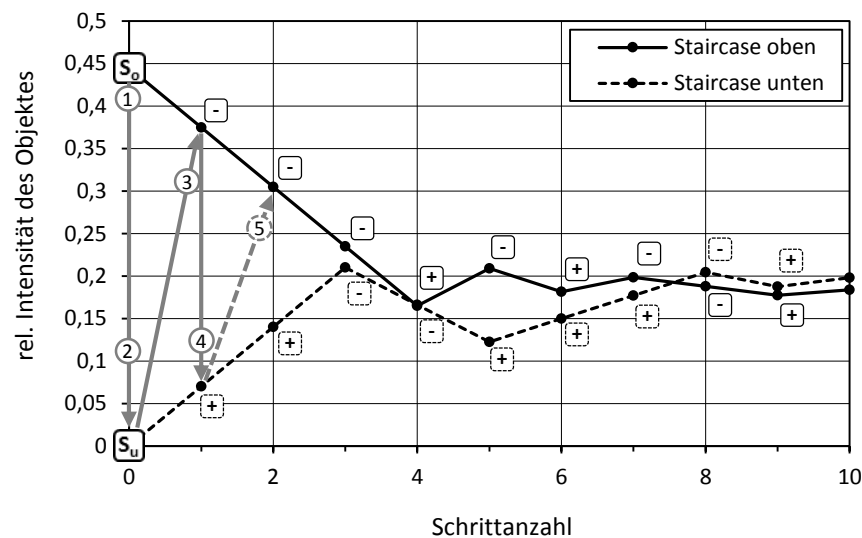


Abbildung 7.9: Schematische Darstellung der doppelten Staircase

S_u S_o - Startwerte der oberen/unteren Staircase

⊕ - Antwort: Objekt nicht wahrgenommen (→ Intensität erhöhen)

⊖ - Antwort: Objekt wahrgenommen (→ Intensität reduzieren)

↓ - Abfolge der dargestellten Intensitäten (Beginn bei S_o)

Im Detail wurde eine spezielle Form der adaptiven Staircase-Methode (vgl. Abschnitt 2.3.5, S. 27) eingesetzt, die nachfolgend genauer beschrieben wird. Adaptive Staircase-Verfahren bestechen durch ihre Einfachheit und gleichzeitige Flexibilität, so dass sie heute in vielen psychometrischen Untersuchungen zum Standardwerkzeug gehören (vgl. LEEK 2001 [111]). Die vollständige Bestimmung der Detektionsschwelle für eine Filterwellenlänge wird nachfolgend als Durchlauf bezeichnet.

Abbildung 7.9 zeigt schematisch den Verlauf der Schwellenermittlung anhand eines Durchlaufs. In seinen Schwellenuntersuchungen zeigt GERDES 1979 [59] auf, dass eine ansteigende Leuchtdichte des Objektes prinzipiell höhere, aber stabilere Schwellen, als für eine abnehmende Leuchtdichte des Objektes liefert. Um diese methodischen Unterschiede zu reduzieren, werden für die Datenerhebung zwei ineinander verschachtelte und alternierende Staircase-Prozeduren verwendet. Die dargestellten Objekt-Intensitäten nähern sich von beiden Seiten der Schwelle und konvergieren. Durch die alternierende Reihenfolge der beiden Staircase-Prozeduren werden unbewusste fehlerhafte Neigungen der Testpersonen bei den wahrzunehmenden Objekten reduziert (vgl. ZWISLER 1998 [185]). Dieses Verfahren ist im Vergleich zu den klassischen Methoden zeitlich sehr effizient.

7.2.2 Ermittlung der Startwerte

Die Startwerte S_o und S_u der beiden Staircase-Prozeduren werden in einer vorgeschalteten „groben Ermittlung der Schwelle“ anhand der Einstellmethode (vgl. Abschnitt 2.3.2, S. 25) individuell für jede Filter-Wellenlänge und jeden Probanden ermittelt. Dazu wird die Intensität des Objektes durch die Testperson bezogen auf die maximal darstellbare Strahldichte des Objektes von 0 % ausgehend in Schritten von 10 % erhöht, bis das Objekt erstmals sicher wahrgenommen werden kann. Von diesem Wert ausgehend können die Startwerte flexibel festgelegt werden. Nach Vorversuchen wurde S_o auf 95 % und S_u auf 5 % dieser Strahldichte festgelegt. Einen ähnlichen Ansatz verwenden FRIEDBURG et al. 1998 [56] bei ihren Messungen zur Dunkeladaptation. Durch diese Vorgehensweise wird gezielt ein enger Bereich um die Schwelle betrachtet. Insbesondere deutlich zu hohe Intensitäten, die die lokale Adaptation beeinträchtigen können und unnötig Zeit in Anspruch nehmen, werden dadurch vermieden. Zudem wird durch diese Vorgehensweise die Testdauer für den Probanden spürbar reduziert. Nach der Ermittlung der Startwerte erfolgt die präzise Bestimmung der Schwelle anhand der adaptiven Staircase.

7.2.3 Ermittlung der Schwelle

CARHART & JERGER 1959 [24] verwendeten als Startwert für ihre akustischen Versuche ein deutlich wahrnehmbares, also überschwelliges Signal. So kann sich der Proband einen Eindruck von dem Reiz verschaffen und hat dadurch einen leichteren Einstieg in den Test. An diese Vorgehensweise angelehnt beginnt jeder Durchlauf einer Filterwellenlänge gemäß Abbildung 7.9 mit der Darstellung des überschwelligen Startwertes der oberen Staircase S_o (①). Eingeleitet wird jedes dargestellte Objekt durch ein kurzes akustisches Signal. Der Proband antwortet für die dargestellte Objekt-Intensität über sein Eingabegerät mit der entsprechenden Taste für „JA - Objekt wahrgenommen“ oder für „NEIN - Objekt nicht wahrgenommen“.

Ohne zeitliche Verzögerung wird anschließend zur unteren Staircase gesprungen. Es wird deren Startwert S_u dargestellt (②) und auf die Eingabe der Testperson gewartet. Parallel dazu wird nach der vorgegebenen Staircase-Methodik die nächste Reizintensität der oberen Staircase unter Berücksichtigung der getroffenen Antwort des Probanden berechnet. Diese wird nun dargestellt (③). Entsprechend dieser Vorgehensweise folgen anschließend die Punkte ④, ⑤ usw. Die Objektstrahldichten aus beiden Staircase-Prozeduren werden somit immer alternierend dargestellt. Die obere Staircase beginnt immer überschwellig mit dem Wert S_o , die untere Staircase immer unterschwellig mit dem Wert S_u .

Zu Beginn eines Durchlaufs führen die Antworten der Testperson zu einer schnellen Annäherung der Werte aus oberer und unterer Staircase (vgl. Abbildung 7.9). In der Nähe der Schwelle erfolgen Richtungswechsel, die jeweils zu einer Reduzierung der Schrittweite um den Faktor 1,8 führen. Aus Vorversuchen hat sich als Abbruchkriterium für einen Durchlauf die Anzahl von insgesamt jeweils 10 Schritten für die obere und die untere Staircase bewährt. Der zusätzliche Erkenntnisgewinn durch eine höhere Schrittzahl ist gering. Stattdessen folgen anschließend zwei weitere Durchläufe mit identischer Parameterkombination, so dass je Interferenzfilter insgesamt 3 Durchläufe erfolgen.

7.2.4 Psychometrische Funktion

Zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen aus den jeweiligen Durchläufen werden die vom Probanden gegebenen Antworten in eine psychometrische Funktion gespeist (vgl. LEVITT 1971 [112], LINSCHOTEN et al. 2001 [114]). Über diese Funktion wird die absolute Strahldichte an der Wahrnehmungsschwelle berechnet (vgl. Abschnitt 2.3.4, S. 25). Der Kehrwert dieser absoluten Strahldichte ergibt die absolute Wahrnehmungsschwelle, die proportional zum spektralen Empfindlichkeitsgrad (normierte Kurve) ist.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Bewertungen der Probanden mittels Ja-/Nein-Antworten abgefragt. Bei Ja-/Nein-Experimenten wird die Schwelle üblicherweise bei einer Wahrscheinlichkeit von 50 % der „Ja“-Antworten festgelegt (GREEN et al. 2008 [66], GOLDSTEIN et al. 2008 [62], FRIEDBURG et al. 1998 [56]; GREULE 1993 [68]) und Abschnitt 2.3.4, S. 25).

7.2.5 Ja-/Nein-Methodik

Ja-/Nein-Abfragen weisen jedoch den Nachteil auf, dass die ermittelte Schwelle maßgeblich von einem stabilen Antwortkriterium des Probanden abhängt (KAERNBACH 2001 [90]). So genannte „forced-choice“-Methoden umgehen diese Problematik. Das Beispiel der am weitesten verbreiteten *forced-choice-Methode mit 2 Alternativen (2AFC)* (vgl. KLEIN 2001 [95]) zeigt jedoch, warum diese Methode aus menschlicher, technischer und physiologischer Sicht auch Schwächen aufweisen kann. Bei der 2AFC kann das wahrzunehmende Objekt an zwei räumlich unterschiedlichen Stellen auftauchen. Der Proband muss sich dann entscheiden („forced-choice“), an welchem von beiden Orten er das Objekt detektiert hat. Er muss sich selbst dann für eine der beiden räumlichen Alternativen entscheiden, wenn kein Objekt dargestellt wird – er muss raten.

Ein Nachteil besteht darin, dass diese Struktur sehr künstlich ist (vgl. GREEN et al. 2008 [66]). Probanden fällt ihre Anwendung mit dem Zwang zum Raten nicht selten schwer. Oft bedarf es auch einer aufwändigen Erklärung gegenüber dem Probanden (KAERNBACH 2001 [90]). Der Zwang zum Raten erfordert bei den Probanden eine intensive Einübungs- und Gewöhnungsphase. Die mittels einer forced-choice-Methode erfassten Schwellen liegen methodisch bedingt in der Regel deutlich unter den Schwellen der Ja-/Nein-Verfahren (GREEN et al. 2008 [66]).

Ein zweiter Nachteil der 2AFC entsteht durch den erhöhten Kalibrieraufwand. Technisch ist es kaum möglich, sowohl den Hintergrund, als auch ein darauf dargestelltes Objekt für alle möglichen geometrischen Positionen auf der Projektionsfläche in den strahlungsphysikalischen Werten konstant zu halten. Deshalb muss jeder Ort der Darstellung separat spektral vermessen und kalibriert werden. Im Fall von zwei räumlichen Alternativen ist der Aufwand damit doppelt so hoch wie bei einer Ja-/Nein-Methode. Durch die räumliche Trennung der beiden alternativen Darstellungsorte tritt auch eine dritte Herausforderung auf – jede Alternative wird auf der Netzhaut des Probanden an einer anderen Stelle abgebildet. Dies kann zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, die nicht auf die untersuchten Parameter zurückzuführen sind.

Zielführender kann unter diesen Umständen die zeitlich versetzte Darbietung der Alternativen mittels des *two-interval-forced-choice-Verfahrens (2IFC)* sein. In diesem Fall taucht das Objekt in beiden

zeitlich zueinander versetzten Intervallen räumlich an derselben Stelle auf, so dass der Kalibrierungsaufwand identisch zur Ja-/Nein-Methode ist. Allerdings gilt auch hier der Nachteil der aufwändigeren Erklärung und Eingewöhnung durch den Zwang zum Raten. Für jede Reizintensität müssen zudem 2 Intervalle dargestellt werden – die Versuchsdauer verdoppelt sich. In Vorversuchen zeigten die Versuchspersonen jedoch nach etwa einer Stunde Ermüdungserscheinungen.

Tabelle 7.6: Übersicht der Parameter des verwendeten Staircase-Verfahrens

Parameter	Auswahl
Verfahren der Reizdarbietung	adaptive verschachtelte Staircase (2x)
Methode der Probanden-Abfrage	Ja-/Nein: Objekt wahrgenommen / nicht wahrgenommen
Schwellenermittlung	über die psychometrische Funktion (PF)
Bestimmen der Startwerte	Einstellverfahren (+ 10 %-Schritte bis Objekt wahrnehmbar)
Startwerte der Staircase-Prozeduren	$S_o = 95\%$ und $S_u = 5\%$ des Wertes aus dem Einstellverfahren
Startwert eines Durchlaufs ¹⁾	Startwert der oberen Staircase S_o
Startschrittweite	9 % ²⁾ ausgehend von S_o und S_u
Schritte bis zur Schrittweitenerhöhung	3
Faktor der Schrittweitenerhöhung	1,6
Faktor der Schrittweitenreduktion	1,8 ³⁾
Schrittanzahl bis Abbruch	10
Wiederholungen je Wellenlänge	3 Durchläufe ¹⁾
Reizankündigung	akustisches Signal
Beginn/Ende von Durchlauf ¹⁾	akustisches Signal
Textansagen	„Testbeginn“; „Adaptation“; „Grobe-“ bzw. „detaillierte Ermittlung der Schwelle“

¹⁾ Durchlauf = vollständige doppelte Staircase für eine Wellenlänge (für *einen* Interferenzfilter)

²⁾ des Startwertes S_o

³⁾ bei Richtungswechsel der Staircase

Betrachtet man die reale Welt, so werden Ja-/Nein-Entscheidungen getroffen (GREEN et al. 2008 [66]). Deshalb sind diese für die meisten Menschen intuitiver begreifbar (LEEK 2001 [111]). Unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Nachteile einer 2AFC und 2IFC wurde deshalb die Ja-/Nein-Methode für die Untersuchungen in dieser Arbeit bevorzugt. Die Versuchsdauer pro Sitzung konnte damit auf knapp über eine Stunde begrenzt werden. Tabelle 7.6 zeigt die verwendeten Parameter zur Ermittlung der Schwelle in einer Übersicht.

7.3 Durchführung der Versuche

Die Kalibrierung des Versuchsaufbaus erfolgt in fünf Schritten (vgl. Abschnitt 6, S. 49 und Abbildung 6.1, S. 49). Die dabei erzeugten Kalibrierdateien bilden die Grundlage für die nachfolgend beschriebene Durchführung der Versuche.

7.3.1 Vorbereitende Tätigkeiten

Die Ablaufsteuerung erfolgt durch eine Software, durch die der Versuchsleiter Schritt für Schritt alle erforderlichen Einstellungen vornimmt. Die Versuchsdurchführung sowie die Erfassung und Speicherung der Daten erfolgt anschließend vollständig automatisiert.

Ein vollständiger Versuch lässt sich in sieben Schritten beschreiben. Abbildung 7.10 zeigt die fünf Schritte der Vorbereitungsphase, die Durchführung und das abschließende Speichern der Daten.

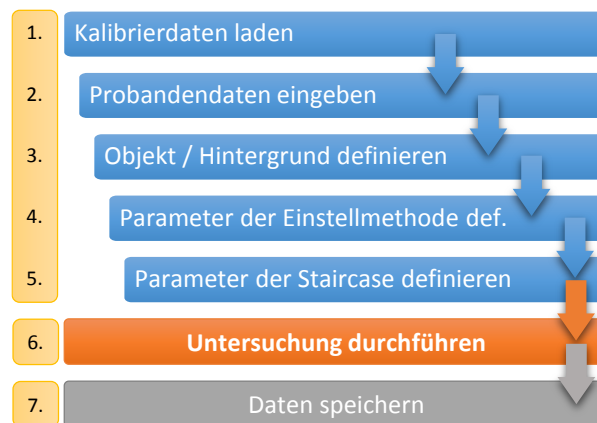


Abbildung 7.10: Einzelschritte eines vollständigen Tests
mit Vorbereitungs-, Durchführungs- und Abschlussphase

Nach dem Laden der Kalibrierdaten und dem Eingeben der Probandendaten werden im darauf folgenden Schritt 3 die Parameter für Objekt und Hintergrund eingestellt. Hierzu zählen die Wellenlänge, der Sehwinkel, der Beobachtungswinkel und die Form des Objektes sowie das Spektrum und die Leuchtdichte der Hintergrund-Beleuchtung zur Adaptation. In Schritt 3 wird auch festgelegt, wie oft ein Objekt mit identischen Eigenschaften je Interferenzfilter wiederholt dargeboten wird und ob die Reihenfolge der Interferenzfilter randomisiert werden soll.

In Schritt 4 werden die Parameter für die grobe Ermittlung der Schwelle anhand der Einstellmethode festgelegt, die zur Bestimmung der Startwerte der beiden Staircase-Prozeduren dient (vgl. Abschnitt 7.2.2, S. 73). In Schritt 5 erfolgt dieselbe Vorgehensweise für die detaillierte Ermittlung der Schwelle anhand der doppelten Staircase. Sind die Vorbereitungen soweit abgeschlossen, beginnt der eigentliche Testablauf, der nachfolgend näher beschrieben wird.

7.3.2 Startphase

Die Testperson sitzt vor dem Versuchsaufbau (vgl. Abbildung 5.1, S. 36 und Abbildung 6.3, S. 52). Die Sitzhöhe sowie die Kinnstütze des Gesichtsrahmens sind korrekt eingestellt. In der Hand befindet sich das Eingabegerät. Die Testperson ist über das Ziel der Untersuchung unterwiesen und kennt den Ablauf anhand von vorherigen Probeläufen. Die Komponenten des Versuchsaufbaus sind kalibriert und befinden sich in einem aufgewärmten, stabilen Zustand. Alle störenden Lichtquellen im Raum sind ausgeschaltet. Nun startet der Versuchsleiter den vollständig automatisierten Testablauf in der Software (vgl. Abbildung 7.11).

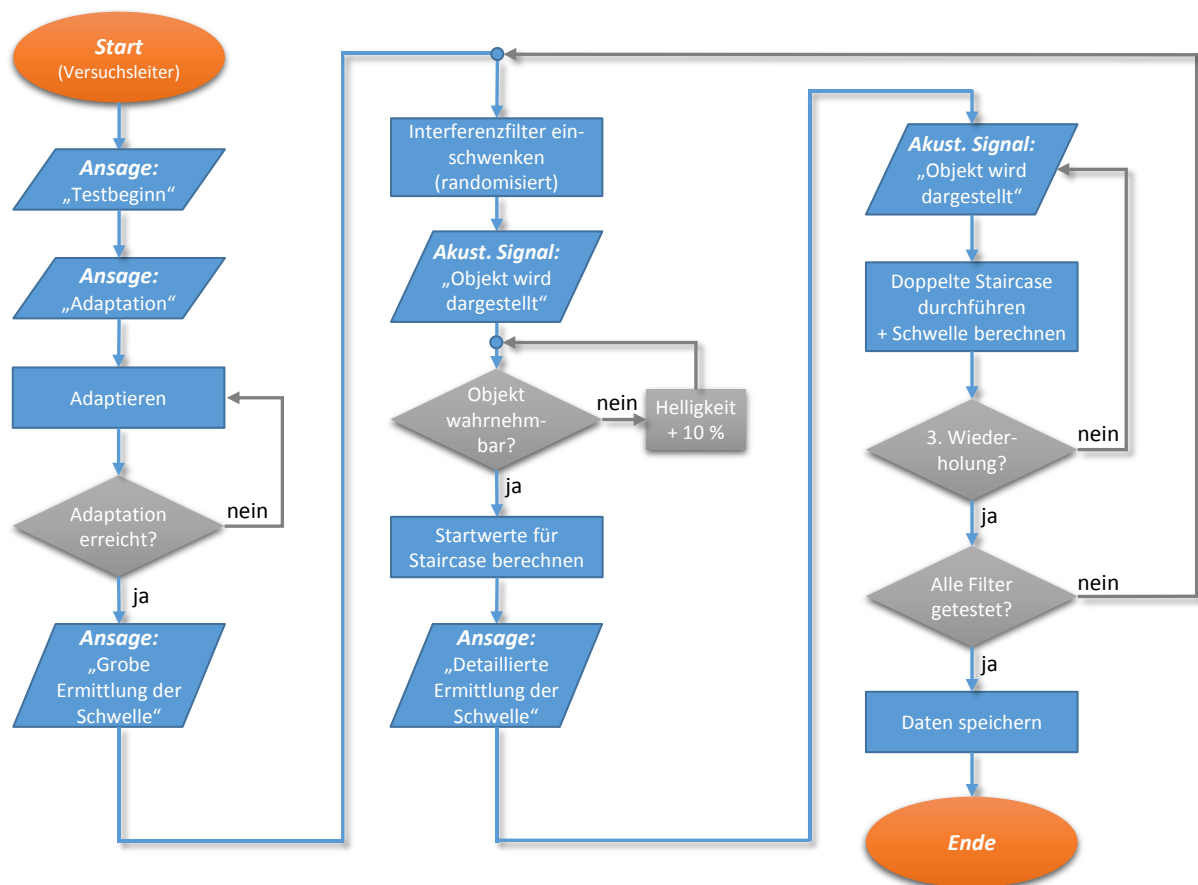


Abbildung 7.11: Ablaufdiagramm des Tests zur Schwellenermittlung (vereinfacht)

7.3.3 Adaptation

Es folgt die Sprachausgabe „Testbeginn“ gefolgt von der Ansage „Adaptation“. Während der Adaptationsphase (vgl. Tabelle 7.5, S. 70) ist die Testperson angehalten, überwiegend auf die Projektionsfläche im Versuchsaufbau zu schauen, um auf die Strahldichte und das Spektrum der aktivierten Hintergrund-Beleuchtung (vgl. Abschnitt 5.6, S. 46) zu adaptieren (vgl. Abschnitt 2.1.3, S. 10).

7.3.4 Grobe Ermittlung der Schwelle (Startwerte)

Nach Ablauf der eingestellten Adaptationszeit folgt die Ansage „Grobe Ermittlung der Schwelle“ und der erste Interferenzfilter wird über das Filterrada randomisiert in den Strahlengang des Projektors geschwenkt. Durch ein kurzes akustisches Signal wird der Testperson signalisiert, dass gerade ein Objekt dargestellt wird und eine Antwort über das Eingabegerät erforderlich ist. Der Startwert beträgt 0 % relative Strahldichte (kein Objekt dargestellt).

Drückt die Testperson am Eingabegerät die Taste für „Nein – Objekt nicht wahrgenommen“, wird die Strahldichte des Objektes um 10 % (bezogen auf die maximale Strahldichte) erhöht. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis das Objekt gerade wahrgenommen wird. Ein Reduzieren der Strahldichte mit der Taste „Ja – Objekt wahrgenommen“, kann ebenfalls in 10 %-Schritten durchgeführt werden. Als Bestätigung, dass der grobe Einstellvorgang abgeschlossen ist, muss eine dritte Taste am Eingabegerät betätigt werden. Diese grobe Einstellung der Schwelle unterliegt keiner zeitlichen Vorgabe sondern obliegt vollständig der Geschwindigkeit der Testperson. Der so ermittelte Wert dient zur Berechnung der Startwerte für die nachfolgende fein aufgelöste Schwellenermittlung.

7.3.5 Detaillierte Ermittlung der Schwelle

Diese beginnt automatisch mit der Sprachansage „Detaillierte Ermittlung der Schwelle“. Der Interferenzfilter aus der vorherigen groben Schwellenermittlung bleibt unverändert im Strahlengang. Wie in Abschnitt 7.2.3 (S. 20) beschrieben, wird zuerst der überschwellige Startwert der oberen Staircase S_o dargestellt. Nach der Eingabe durch die Testperson wechselt die Darstellung zu S_u und dann alternierend zwischen den Werten von oberer und unterer Staircase hin und her. Die Intensitäten werden in Abhängigkeit der Probandeneingabe bestimmt, bis das Abbruchkriterium erreicht ist. Ein solcher Durchlauf erfolgt je Interferenzfilter drei Mal hintereinander, jeweils gefolgt von der Ermittlung der absoluten Schwellenstrahldichte über die psychometrische Funktion (vgl. Abschnitt 7.2.4, S. 74). Darauf folgt der randomisierte Wechsel des Interferenzfilters mit identischem Ablauf – zuerst die Ermittlung der Startwerte und dann die dreimalige Schwellenermittlung anhand der Staircase. Auf diese Weise wird verfahren, bis alle 22 Filter verwendet worden sind.

7.3.6 Versuchsdauer

Die grobe Ermittlung und die nachfolgende dreifache detaillierte Ermittlung der Schwelle dauern für einen Interferenzfilter ca. zwei Minuten. Um dem Probanden zwischendurch die Möglichkeit zur Entspannung zu geben, kann zu jeder groben Ermittlung der Schwelle auf Wunsch eine freie Pause eingelegt werden. Die dreimalige detaillierte Ermittlung der Schwelle läuft hingegen unter einem festen Zeittakt automatisch ab und kann nicht unterbrochen werden. Ein zügig absolvierter vollständiger Test dauert ca. 70 - 80 Minuten. In dieser Zeit werden 22 grobe Schwellenermittlungen sowie 66 detaillierte Wahrnehmungsschwellen aufgenommen. Die Testpersonen haben für alle untersuchten Bedingungen eine Gesamtanzahl von 166320 einzelnen Ja-/Nein-Bewertungen abgegeben.

7.3.7 Versuchsleiter

Der Untersuchungsablauf ist so ausgelegt, dass der Einfluss des Versuchsleiters minimiert wird. Prinzipiell kann eine Testperson den Versuch nach dem Start der Software eigenständig durchführen. Für Rückfragen, die Überwachung des Versuchsablaufs und das gelegentliche Zuführen frischer Luft in den Versuchsaufbau ist die Anwesenheit eines Versuchsleiters dennoch fast ausnahmslos gegeben gewesen.

7.4 Testpersonen

Für die Labortests wurden insgesamt 14 farbnormalsichtige Testpersonen im Alter zwischen 24 und 43 Jahren bei einem durchschnittlichen Alter von 30 Jahren untersucht. 11 Personen sind männlich, 3 weiblich (vgl. Tabelle 7.7). Sieben Testpersonen wurden für beide Beobachtungswinkel $\theta = 2,65^\circ$ und $\theta = 10^\circ$ getestet. Mit den Testpersonen wurden vor den Untersuchungen Tests auf Farbnormalsichtigkeit mit dem Farnsworth Panel D-15 (vgl. LINKSZ 1966 [113]), dem Lanthony Desaturated Panel D-15 (vgl. LANTHONY 1978 [109]) sowie Farbtafeln (vgl. ICHIKAWA et al. 1983 [82], ICHIKAWA et al. 1979 [83]) durchgeführt (vgl. Anhang C, S. 150).

Tabelle 7.7: Übersicht der Testpersonen

TP	Alter	Geschlecht	Sehhilfe	Normalsichtig	$\theta = 2,65^\circ$	$\theta = 10^\circ$
CB	30	m	nein	ok	x	
CS	37	m	nein	ok	x	
DE	25	m	nein	ok	x	
DP	31	m	nein	ok	x	-
DS	26	w	nein	ok	x	
JK	25	m	nein	ok	-	x
KK	30	m	nein	ok	x	
KS	26	w	nein	ok	-	x
MW	31	m	nein	ok	x	
PB	43	m	nein	ok	x	
SS	35	m	nein	ok	x	
TY	24	m	nein	ok	-	x
WP	31	m	nein	ok	x	-
YL	24	w	nein	ok	-	x
14	$\bar{\varnothing} = 30$	11 (m), 3 (w)	-	-	10	12

8 Grundlagen der statistischen Analyse

In Kapitel 8 werden die verwendeten statistischen Begriffe und Methoden dargestellt. Die daraus resultierenden aufbereiteten Ergebnisse zeigt Kapitel 9.

8.1 Statistische Begriffe und Definitionen

Bei der Aufbereitung empirisch erhobener Daten und der Prüfung signifikanter Zusammenhänge stellt die Statistik eine Auswahl an verschiedenen Methoden zur Verfügung. In der Regel sind diese Methoden an Voraussetzungen bei der Datenerhebung und der Datenstruktur gebunden. Aus diesem Grund sind geeignete Methoden zu finden, die für die im Labor ermittelten Daten zulässig sind. Zuvor wird nachfolgend ein kurzer Überblick über verwendete Grundbegriffe und Definitionen der Statistik gegeben.

8.1.1 Abhängige vs. unabhängige Stichproben

Bei der Erhebung mehrerer Stichproben ist eine Unterscheidung zwischen abhängigen und unabhängigen Stichproben erforderlich. Alternativ werden auch die Begriffspaare ungepaart/gepaart bzw. unverbunden/verbunden verwendet. Die entsprechende Festlegung findet bereits bei der Auslegung der Versuche bzw. der Datenerhebung statt. In der klinischen Forschung werden oft eine Versuchs- und eine Kontrollgruppe unter denselben Bedingungen untersucht. Dadurch, dass sich in jeder der beiden Gruppen jedoch unterschiedliche Personen befinden, sind diese Stichproben unabhängig. Wenn ein und dasselbe Probandenkollektiv hingegen zwei oder mehr unterschiedliche Situationen bewertet, entspricht das einer Messwiederholung. Diese stellt einen Sonderfall der abhängigen Stichprobe dar (vgl. BORTZ & LIENERT 2008 [14]). Tabelle 8.1 verdeutlicht den Zusammenhang.

Tabelle 8.1: Vergleich von verbundenen und unverbundenen Stichproben

	Testbedingung (verbundene Stichprobe)			Testbedingung (unverbundene Stichprobe)					
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃
TP ₁	B _{1 1}	B _{1 2}	B _{1 3}	TP ₁	B _{1 1}	TP ₇	B _{7 2}	TP ₁₃	B _{13 3}
TP ₂	B _{2 1}	B _{2 2}	B _{2 3}	TP ₂	B _{2 1}	TP ₈	B _{8 2}	TP ₁₄	B _{14 3}
TP ₃	B _{3 1}	B _{3 2}	B _{3 3}	TP ₃	B _{3 1}	TP ₉	B _{9 2}	TP ₁₅	B _{15 3}
TP ₄	B _{4 1}	B _{4 2}	B _{4 3}	TP ₄	B _{4 1}	TP ₁₀	B _{10 2}	TP ₁₆	B _{16 3}
TP ₅	B _{5 1}	B _{5 2}	B _{5 3}	TP ₅	B _{5 1}	TP ₁₁	B _{11 2}	TP ₁₇	B _{17 3}
TP ₆	B _{6 1}	B _{6 2}	B _{6 3}	TP ₆	B _{6 1}	TP ₁₂	B _{12 2}	TP ₁₈	B _{18 3}

TP_x – Testperson Nr. X

T_y – Testbedingung Y;

B_{xy} – von Testperson X abgegebene Bewertung für Testbedingung Y

Bei der verbundenen Stichprobe bewertet das Probandenkollektiv aus den Testpersonen $TP_1 - TP_6$ jeweils die Testbedingungen $T_1 - T_3$. Jeder Proband bewertet demnach jede Testbedingung. Bei der unverbundenen Stichprobe hingegen sind es drei unterschiedliche Personengruppen, die die Testbedingungen $T_1 - T_3$ bewerten. Dies entspricht insgesamt 18 Personen statt wie zuvor 6 Personen. Somit sind die für die einzelnen Testbedingungen abgegebenen Bewertungen in diesem Fall unabhängig voneinander.

Im der vorliegenden Laboruntersuchung wurde jeweils eine einzige Probandengruppe herangezogen, um unter verschiedenen Bedingungen die visuelle Wahrnehmungsschwelle zu ermitteln. Die so erhaltenen Stichproben sind damit verbunden bzw. gepaart. International wird hier auch der Begriff „matched samples“ verwendet.

8.1.2 Abhängige vs. unabhängige Variablen

Bei der statistischen Analyse wird zudem zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen unterschieden. Nach BORTZ & SCHUSTER 2010 [15] werden unter den unabhängigen Variablen diejenigen Merkmale verstanden, deren Auswirkungen auf andere Merkmale – die abhängigen Variablen – überprüft werden sollen. Im vorliegenden Fall sind zwei unabhängige Variablen, auch Faktoren genannt, vorhanden. Dies sind die spektrale Zusammensetzung der Hintergrundbeleuchtung (Adaptation) und die unterschiedlichen Wellenlängen der Interferenzfilter (Objekt). Abhängige Variable ist die ermittelte Strahldichte des wahrzunehmenden Objektes bzw. die daraus berechnete Wahrnehmungsschwelle.

8.1.3 Parametrische vs. nichtparametrische statistische Tests

Bei statistischen Testverfahren wird zwischen parametrischen und nichtparametrischen Tests unterschieden. Letztere werden auch als verteilungsunabhängige bzw. verteilungsfreie Tests bezeichnet. Parametrische Tests setzen das Vorliegen und Bekanntsein bestimmter Verteilungsformen voraus, da die Parameter dieser Verteilung von Interesse sind. Diese Testverfahren besitzen deshalb nur unter bestimmten Voraussetzungen ihre Aussagekraft. Dies erfordert, dass die Bedingungen der Anwendbarkeit von parametrischen Tests zuvor immer geprüft werden. Nichtparametrische Tests verlangen weniger oder schwächere Voraussetzungen (vgl. BORTZ & LIENERT 2008 [14]).

Parametrische Tests sind bei der Untersuchung von Hypothesen in der Forschung oft die bevorzugte Wahl. Sie bilden die Gruppe der am häufigsten verwendeten statistischen Verfahren. Ein Grund für diese Beobachtung ist höhere Teststärke, da verteilungsunabhängige Tests einen höheren Fehler 2. Art (β -Fehler) in Kauf nehmen (vgl. SACHS & HEDDERICH 2006 [142]).

8.2 Statistische Tests und Methoden

Für die statistische Bearbeitung und Auswertung der Daten wurde das Softwarepaket *IBM SPSS Statistics 22* in Kombination mit dem Programm *Microsoft Excel 2013* verwendet. Ein Vorteil von SPSS besteht darin, dass die meisten gängigen statistischen Tests bereits integriert sind. Auch die Prüfung

der Voraussetzung zur Anwendung der Tests lässt sich bei entsprechend aufbereiteten Daten durchführen. Die Korrektheit der Berechnungen in SPSS wurde dennoch anhand von Stichproben überprüft.

Nachfolgend werden die für die Analyse der Daten ausgewählten Tests näher beschrieben.

8.2.1 Auswahl eines geeigneten Testverfahrens

Bei den durchgeführten Laboruntersuchungen wird nach entsprechenden Voruntersuchungen davon ausgegangen, dass die erfassten Daten die Bedingung der Normalverteilung erfüllen und auch die weiteren Voraussetzungen zur Nutzung parametrischer Verfahren erfüllt werden. In Abschnitt 8.2.2 ff. auf S. 84 wird auf diese Voraussetzungen und deren Prüfung näher eingegangen. Zuvor werden im Folgenden die Auswahl sowie die Eigenschaften eines geeigneten parametrischen Tests beschrieben.

Ein geeignetes parametrisches Verfahren, das bei der vorhandenen Datenstruktur angewendet werden kann, ist die *zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung*. Im englischen Sprachraum wird die Varianzanalyse als *Analysis of Variance (ANOVA)* bezeichnet. Die ANOVA stellt eine Hauptgruppe der parametrischen Verfahren dar. Der Begriff „zweifaktoriell“ bezieht sich auf die beiden unabhängigen Variablen „Hintergrundspektrum“ (Adaptation) und „Objektspektrum“ (Interferenzfilter). Der Term „Messwiederholung“ deutet das Vorliegen verbundener Stichproben an (vgl. Abschnitt 8.1.2).

Bei einem mehrfaktoriellen Versuchsdesign können die einzelnen unabhängigen Variablen (Faktoren) einerseits einen direkten Einfluss auf die abhängige Variable besitzen (Haupteffekte). Andererseits können aber auch die spezifischen Kombinationen der Faktoren einen Einfluss aufweisen (Interaktion).

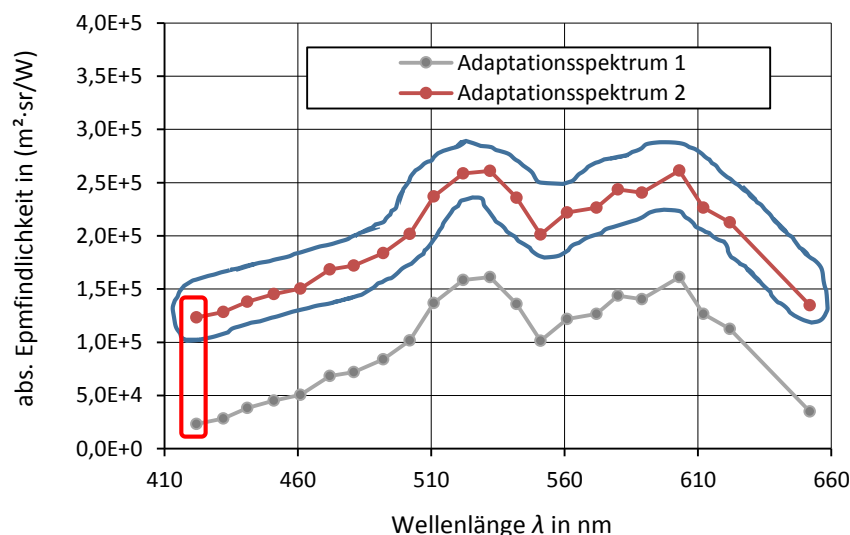


Abbildung 8.1: Beispiel für eine nicht signifikante Interaktion bei zwei Adaptationsspektren
rot: Analyse des einfachen Haupteffekts „Adaptationsspektrum“ bei $\lambda_s = 422$ nm
blau: Analyse des einfachen Haupteffekts „Objektspektrum“ für das Adaptationsspektrum 1

Auf die in dieser Arbeit betrachteten Daten bezogen entspricht eine Interaktion der Frage: „besitzen die spektrale Zusammensetzung der Hintergrundbeleuchtung (Adaptationsspektrum) und die Wahl des Interferenzfilters (Objektspektrum) einen sich gegenseitig beeinflussenden Effekt auf die gemessene Wahrnehmungsschwelle?“

Für eine grafische Interpretation der Abhängigkeiten werden die Mittelwerte einer der beiden Faktoren (hier: die Filterwellenlänge) in einem Diagramm auf der x-Achse gegen die abhängige Variable (Schwellenempfindlichkeit) auf der y-Achse aufgetragen. Die Mittelwerte des zweiten Faktors (hier: das Adaptationsspektrum) werden durch separate Datenreihen dargestellt. Diese Darstellungsform wird als Profildigramm bezeichnet. Abbildung 8.1 zeigt ein Profildigramm am Beispiel von zwei unterschiedlichen Adaptationsspektren für die 22 verschiedenen Objektspektren. Die beiden Kurven zeigen die mittlere spektrale Schwellenempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge und dem Adaptationsspektrum.

Dadurch, dass beide Spektren in diesem fiktiven Fall parallel verlaufen, ist keine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Adaptationsspektrum und Filterwellenlänge vorhanden (vgl. SACHS & HEDDERICH 2006 [142]). Eine Interaktion wäre im Falle nicht paralleler oder sich schneidender Kurven vorhanden (s. auch PFISTER 2008 [134]).

Grundsätzlich lassen sich die wesentlichen Untersuchungskriterien der zweifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung am Beispiel von Abbildung 8.1 gemäß Abbildung 8.2 wie folgt zusammenfassen:

- Liegt eine Interaktion der beiden Faktoren vor? (→ nein, da beide Kurven parallel verlaufen)
- Liegt ein Haupteffekt für das Adaptationsspektrum vor? (→ ja, da beide Kurven parallel verlaufen statt deckungsgleich übereinander zu liegen)
- Liegt ein Haupteffekt für die Filterwellenlänge vor? (→ ja, da beide Kurven nicht linear parallel zur x-Achse verlaufen, sondern eine ausgeprägte Kurvenform aufweisen)

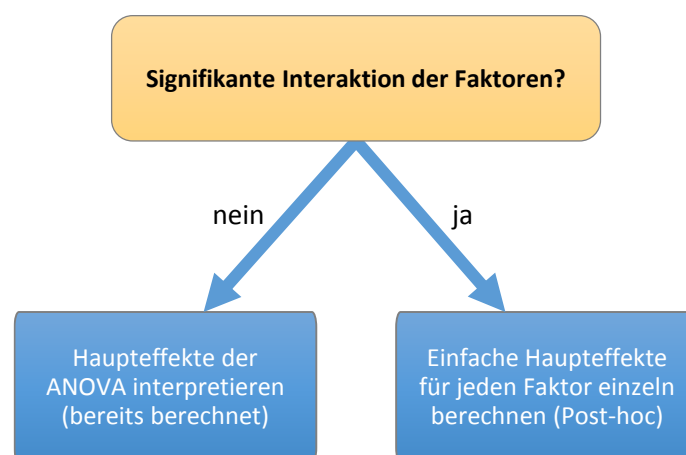


Abbildung 8.2: Entscheidungsbaum je nach Auftreten einer signifikanten Interaktion

Die zweifaktorielle ANOVA (mit Messwiederholung) prüft unter SPSS als Gesamtmodell sowohl vorhandene Haupteffekte, als auch eine mögliche Wechselwirkung der beiden Innersubjekt-Faktoren auf die abhängige Variable. Nach der Prüfung des Gesamtmodells muss vor einer Interpretation der

einzelnen Haupteffekte zuerst immer die Signifikanz der Interaktion geprüft werden (vgl. JANSSEN & LAATZ 2013 [87], LÜPSEN [118]). In Abhängigkeit davon, ob die ANOVA rechnerisch eine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren aufweist oder nicht, ist anschließend eine unterschiedliche Vorgehensweise erforderlich.

8.2.1.1 Nicht signifikante Interaktion

Im Fall einer nicht signifikanten Interaktion zwischen den beiden Faktoren müssen die ermittelten Testergebnisse für die Haupteffekte einzeln interpretiert werden (vgl. LUND & LUND 2013 [117]). Sie gelten in diesem Fall global (vgl. LÜPSEN [118]). Ist beispielsweise der Einfluss des Adaptationsspektrums bei nicht vorhandener Interaktion signifikant, so gilt dies für alle Gruppen des zweiten Faktors – im vorliegenden Fall also für alle untersuchten Objektspektren bzw. Interferenzfilter (vgl. Abbildung 8.1, S. 82).

8.2.1.2 Signifikante Interaktion

Wird eine signifikante Interaktion zwischen den Innersubjekt-Faktoren festgestellt, so sind alle weiteren durchgeführten Signifikanztests der ANOVA zu den Haupteffekten hinfällig, weil das Berechnungsmodell für die Haupteffekte dann nicht mehr zutrifft (vgl. JANSSEN & LAATZ 2013 [87]). In diesem Fall muss der Einfluss der beiden Faktoren „Adaptationsspektrum“ und „Objektspektrum“ in einem zusätzlichen Schritt über die Funktion der *einfachen* Haupteffekte analysiert werden.

Analyse 1: Einfluss des Adaptationsspektrums

Für jede Wellenlänge muss eine einfaktorielle Varianzanalyse über jeweils alle vorhandenen spektralen Empfindlichkeiten (hier im Beispiel: 2) durchgeführt werden. So werden für $\lambda_s = 422 \text{ nm}$ die Werte der spektralen Empfindlichkeit bei Adaptationsspektrum 1 und Adaptationsspektrum 2 auf signifikante Unterschiede untersucht (s. Abbildung 8.1, rote Umrahmung). Ebenso wird für $\lambda_s = 432 \text{ nm}$, 441 nm und alle anderen Filter verfahren.

Analyse 2: Einfluss des Objektspektrums

Analog muss für jedes Adaptationsspektrum eine einfaktorielle Varianzanalyse über alle Wellenlängen erfolgen. So wird für alle 22 Filter von Adaptationsspektrum 1 geprüft, ob hier signifikante Unterschiede vorhanden sind (s. Abbildung 8.1, blaue Umrahmung). In gleicher Weise wird mit Adaptationsspektrum 2 verfahren.

Diese Analysen der einfachen Haupteffekte dürfen jedoch nur im Falle einer signifikanten Interaktion durchgeführt werden (vgl. LÜPSEN [118]).

8.2.2 Voraussetzungen bei der Anwendung parametrischer Tests

Um die Zulässigkeit der Verwendung einer zweifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung zu überprüfen wird nachfolgend kurz auf die Voraussetzungen eingegangen. Nur, wenn eine oder mehrere dieser Voraussetzungen nicht erfüllt sind, sollte ein äquivalentes nichtparametrisches Testverfahren ausgewählt werden.

Bei parametrischen Tests ist eine häufige und wichtige Voraussetzung, dass die zu prüfenden statistischen Kennwerte normalverteilt sind. Zusätzlich ist bei kleineren Stichproben ($n < 30$) und bei

stichprobenvergleichenden Tests die Varianzgleichheit bzw. die Varianzhomogenität (Homoskedastizität) in allen Stichproben erforderlich (vgl. BORTZ & LIENERT 2008 [14]). Bei parametrischen Tests mit Messwiederholung (verbundene Stichproben) mit mehr als 2 Stufen müssen sogar die Varianzen aller möglichen Differenzen gleich sein (vgl. PFISTER 2008 [134]). Diese Voraussetzung wird auch als Sphärizität bezeichnet (vgl. LÜPSEN [118]).

Für den Fall einer zweifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung lassen sich die Voraussetzungen einer Anwendung nach LUND & LUND 2013 [116] wie folgt zusammenfassen:

1. Die abhängige Variable, im vorliegenden Fall die ermittelte Schwelle, muss mittels einer Intervall- oder Verhältnisskala kontinuierlich erfasst sein.
2. Die beiden unabhängigen Variablen, auch Innersubjekt-Faktoren genannt, müssen mindestens aus zwei verbundenen Stichproben bestehen.
3. Es dürfen keine signifikanten Ausreißer in der erfassten Datenmenge sein. Ausreißer beeinflussen die ANOVA, indem sie die Unterschiede zwischen den abhängigen Stichproben verzerren.
4. Die abhängige Variable muss in jeder Kombination annähernd normalverteilt sein. Genau genommen gilt diese Anforderung nicht für die Rohdaten, sondern für die Residuen. „Annähernd“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung an sich robust gegen leichte Verletzungen dieser Annahme ist.
5. Die Varianzen der Differenzen zwischen allen Kombinationen der verbundenen Stichproben müssen gleich sein (Varianzhomogenität, Sphärizität).

Die Voraussetzungen 1) und 2) für die Anwendung einer ANOVA werden durch die Durchführung der Untersuchungen und die Struktur der Daten bereits erfüllt. Nachfolgend findet eine Beschreibung der Tests zur Überprüfung der Voraussetzungen 3) – 5) statt.

8.2.3 Prüfung auf Ausreißer (Voraussetzung 3)

Die Ursachen für Ausreißer können Mess-, Übertragungs-, Berichts-, Rechenfehler oder die Annahme einer falschen Verteilung sein (RÖNZ et al. 1994 [140]) (zitiert aus BUTTLER 1996 [22]). Der Begriff „Ausreißer“ wird in der Literatur nicht einheitlich definiert. Es gibt kein objektives Kriterium, ob ein Wert einen Ausreißer darstellt oder nicht. Es liegt vielmehr im Ermessen des Bearbeiters. Eine gängige Definition beschreibt Ausreißer als Werte, die mit den restlichen Daten unvereinbar erscheinen (vgl. BUTTLER 1996 [22]). Unstrittig ist, dass Ausreißer die Ergebnisse insbesondere bei kleinen Stichproben deutlich verfälschen können. Auch das Verfahren der ANOVA ist hier betroffen. Treten Ausreißer in einer Verteilung auf, so muss die Ursache überprüft und entschieden werden, wie damit umzugehen ist. Auf die genaue Verfahrensweise mit identifizierten Ausreißern soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Vertiefende Literatur zu diesem Thema liefert u.a. SCHENDERA, CHRISTIAN F. G 2007 [144], JANSSEN & LAATZ 2013 [87], PARKE 2013 [131], AGUINIS et al. 2013 [2]; BEN-GAL 2005 [9].

8.2.3.1 Boxplot

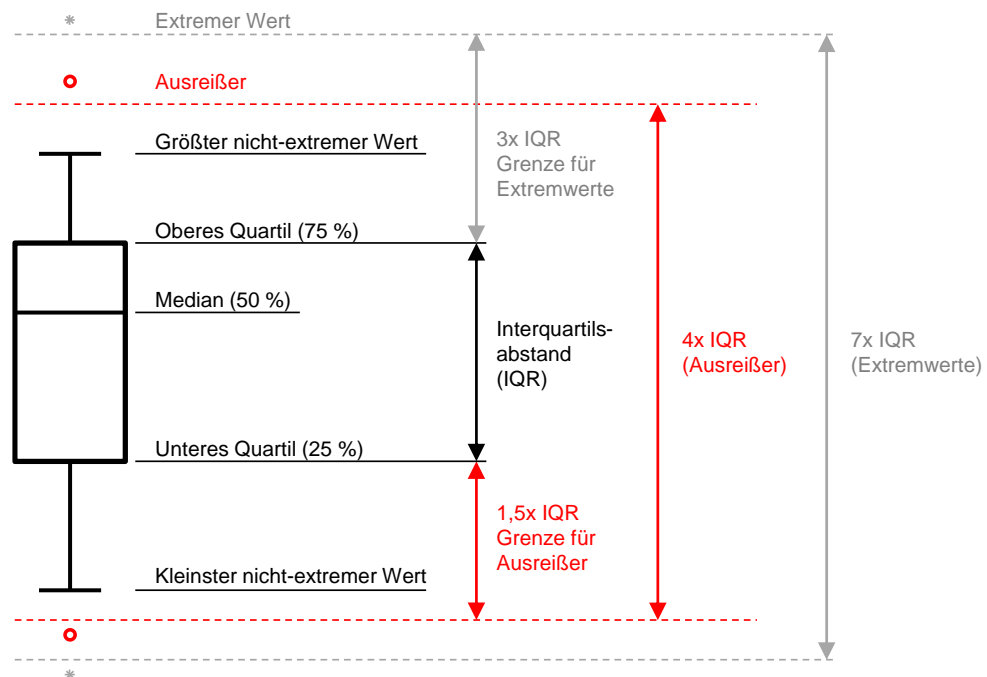


Abbildung 8.3: Schematische Darstellung eines Boxplots mit Kennwerten sowie Ausreißern und Extremwerten

Ein einfaches Verfahren zur Visualisierung von Ausreißern ist die Nutzung von Boxplots. Diese bieten den Vorteil einer schnellen grafischen Übersicht über wichtige Eigenschaften einer Datenmenge, auffällige Werte eingeschlossen. Abbildung 8.3 zeigt die schematische Darstellung eines Boxplots, wie sie auch in SPSS verwendet wird. Die Box selbst enthält die mittleren 50 % aller Werte. Das obere Quartil fasst 75 %, der Median 50 % und das untere Quartil 25 % der Werte nach unten hin ein. Der Median gibt zudem bei außermittiger Lage eine Information zur Schiefe der Verteilung. Der Abstand zwischen oberem Rand (Quartil) und unterem Rand (Quartil) der Box wird als *Interquartilsabstand (IQR)* bezeichnet.

Befinden sich Werte vom oberen Quartil nach oben hin und vom unteren Quartil nach unten hin über 1,5 Boxlängen (IQR) entfernt, so werden diese als Ausreißer definiert. Der letzte Wert vor Erreichen dieser 1,5-IQR-Grenzen wird jeweils mit der Antenne (engl.: Whisker) dargestellt. Der Abstand zwischen den beiden Whiskern wird als Spannweite bezeichnet. Wird die Grenze von 3 Interquartilsabständen erreicht, so werden alle außerhalb liegenden Werte als Extremwerte bezeichnet (vgl. JANSSEN & LAATZ 2013 [87], SACHS & HEDDERICH 2006 [142]).

8.2.3.2 Studentisierte Residuen

Ein weiteres gängiges Verfahren zur Überprüfung auf Ausreißer nutzt die studentisierten Residuen einer Datenmenge. Die Studentisierung ist eine Form der Standardisierung. Die Standardisierung ist die Überführung einer Zufallsvariablen X mit dem Erwartungswert $E(X) = \mu$ und der Varianz $Var(X) = \sigma^2$ in eine Standardnormalverteilung der Zufallsvariablen Z mit dem Erwartungswert $E(Z) = 0$ und der Varianz $Var(Z) = 1$. Da in der Regel die genaue Verteilung der zugrunde liegenden

Variable der Stichprobe nicht bekannt ist, wird statt dem Erwartungswert μ das arithmetische Mittel der Stichprobe \bar{x} und statt der Varianz die Stichprobenvarianz s genommen. Dieses Vorgehen wird als *Studentisierung* bezeichnet. Nach IBM [81] ist ein nicht standardisiertes Residuum der tatsächliche Wert der abhängigen Variablen minus des vom Modell geschätzten Werts. Für die Studentisierung eines Residuums wird es durch seine geschätzte Standardabweichung geteilt. Diese Standardabweichung variiert je nach der Distanz zwischen den Werten der unabhängigen Variablen des Falles und dem Mittelwert der unabhängigen Variablen von Fall zu Fall (vgl. JANSSEN & LAATZ 2013 [87]).

Die Umrechnung erfolgt mit Gleichung 8.1 (vgl. BORTZ & SCHUSTER 2010 [15]).

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_k (x_k - \bar{x})^2}} \quad \text{Studentisierung} \quad 8.1$$

mit:

- z_i Z – transformierter Wert der Stichprobe
- x_i Originalwert der Stichprobe
- \bar{x} Mittelwert der Stichprobe
- s Standardabweichung der Stichprobe

Wenn die Werte der Stichprobe bereits (annähernd) normalverteilt waren, so sind die studentisierten Werte anschließend (annähernd) standardnormalverteilt. Die Art der Verteilung wird durch die Transformation nicht verändert. Es findet lediglich eine Verschiebung sowie ein Stauchen bzw. Strecken statt.

SPSS bietet die Möglichkeit, die studentisierten Residuen zu berechnen und in der Datentabelle für die weitere Verarbeitung mit abzuspeichern. Diese Residuen werden anhand tabellierter oberer Signifikanzschranken für standardisierte Extremabweichungen geprüft. So gilt für $n = 10$ und $P = 99\%$ ein Grenzwert von $\pm 3,089$ (vgl. SACHS & HEDDERICH 2006 [142]). Alle Werte in den studentisierten Residuen, die unter $-3,089$ und über $+3,089$ liegen, werden demnach als Ausreißer identifiziert.

8.2.3.3 4 σ -Regel

Eine schnellen Überblick gibt nach SACHS & HEDDERICH 2006 [142] auch die folgende Empfehlung: „Eine allgemeine Regel besagt, dass bei mindestens 10 Einzelwerten (besser: $n \geq 25$) ein Wert dann als Ausreißer verworfen werden darf, wenn er außerhalb des Bereiches $\bar{x} \pm 4s$ liegt, wobei Mittelwert und Standardabweichung ohne den ausreißerverdächtigen Wert berechnet werden.“

8.2.4 Prüfung auf Normalverteilung (Voraussetzung 4)

Für die Überprüfung der Residuen auf Normalverteilung existieren verschiedene Möglichkeiten.

8.2.4.1 Grafische Überprüfung

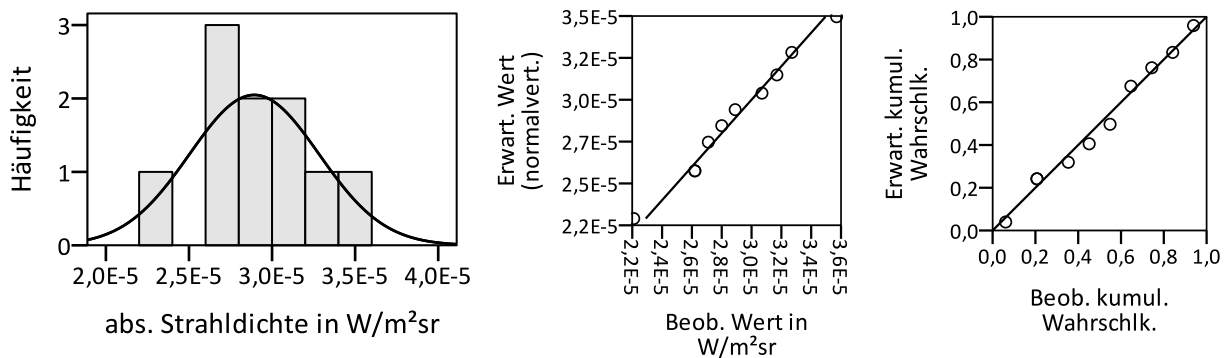


Abbildung 8.4: Grafische Überprüfung auf Normalverteilung (10x Schwelle bei Filter 530 nm)
links: Histogramm
Mitte: Q-Q-Diagramm
rechts: P-P-Diagramm

Eine gute und schnelle, dafür aber weniger zuverlässige Einschätzung bieten grafische Darstellungen. Dies kann mit Hilfe von Histogrammen (Häufigkeitsverteilungen), der Darstellung von *Quantil-Quantil-Diagrammen* (Q-Q-Plots) oder in *Probability-Probability-Diagrammen* (P-P-Plots) erfolgen. Q-Q-Diagramme dienen dazu, die direkt beobachteten und die bei Vorliegen der Vergleichsverteilung zu *erwartenden Werte* gegeneinander aufzutragen. Bei einem Vergleich mit der Normalverteilung werden diese Diagramme auch als *Normal-Quantil-Plots* (N-Q-Plots) bezeichnet (vgl. FAHRMEIR 2004 [51]).

Im Gegensatz zum Q-Q-Diagramm werden im artverwandten P-P-Diagramm die *kumulierten Häufigkeiten* der beobachteten Werte gegen die erwarteten kumulierten Häufigkeiten der Referenzverteilung – hier der Normalverteilung – aufgetragen. Die Diagonale entspricht der vollständigen Übereinstimmung (vgl. GHASEMI & ZAHEDIASL 2012 [60]).

Abbildung 8.4 zeigt die drei beschriebenen Diagrammtypen am Beispiel der zehnfach wiederholten Schwellenermittlung für den Interferenzfilter mit 530 nm aus Abbildung 7.7, S. 69. Während das Histogramm anzeigt, dass die Verteilung der Stichprobe rechtsschief ist, zeigen sowohl das Q-Q-, als auch das P-P-Diagramm, dass die Abweichung von der Normalverteilung nicht gravierend ist.

8.2.4.2 Statistische Prüfverfahren

Neben den grafischen Möglichkeiten zur Überprüfung der Übereinstimmung mit der Normalverteilung bieten statistische Testverfahren zu diesem Zweck präzisere Informationen (vgl. ÖZTUNA et al. 2006 [130]). Sie prüfen die Anpassungsgüte an eine vorgegebene Verteilung (engl. *goodness of fit*). Im Falle der Normalverteilung finden zwei verschiedene Tests in der Praxis häufige Anwendung.

Eine Möglichkeit besteht in der Nutzung des *Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests* (K-S-Test), eines Einstichprobentests. Dieser wird in der Literatur teilweise an beiden Stellen auch mit doppeltem „f“ oder einem „w“ statt „v“ geschrieben. Der K-S-Test wird verwendet, um anhand der empirischen Verteilungsfunktion der Stichprobe zu überprüfen, ob diese beobachteten Daten einer speziellen Verteilung entsprechen (vgl. SACHS & HEDDERICH 2006 [142]). Wenn die Parameter der Vergleichsverteilung

– hier der Normalverteilung – aus den Stichprobenwerten geschätzt werden müssen, sind die kritischen Werte des K-S-Tests jedoch nicht exakt (zu konservativ). Zudem reagiert der Test sehr sensitiv auf Extremwerte. Aus diesen Gründen werden in der Praxis die modifizierten Signifikanzlevel nach Lilliefors benutzt (vgl. JANSSEN & LAATZ 2013 [87]). Diese ergeben ein genaueres Ergebnis als der einfache K-S-Test. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass der K-S-Test aufgrund seiner vielseitigen Einsetzbarkeit jedoch eine geringe Teststärke (engl. *Power*) besitzt.

Ein alternatives Prüfverfahren ist der *Shapiro-Wilk-Test*. Dieser wurde speziell für die Überprüfung auf eine Normalverteilung entwickelt. Er weist unter vergleichbaren Tests wie dem K-S-Test u.a. selbst für kleine Stichproben ($n < 30$) die beste Teststärke auf (vgl. RAZALI & WAH 2011 [137]). Allerdings erfordert er jedoch auch einen höheren Rechenaufwand. In der Praxis wird der Shapiro-Wilk-Test aufgrund seiner Vorzüge bei kleinen Stichproben oft bevorzugt verwendet (vgl. ÖZTUNA et al. 2006 [130]).

In SPSS werden bei Prüfung auf Normalverteilung standardmäßig die Werte des K-S-Tests und des Shapiro-Wilk-Tests ausgegeben. Auf die detaillierten Hypothesen und Berechnungsverfahren soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Weitere Informationen sind u.a. bei RAZALI & WAH 2011 [137] und SACHS & HEDDERICH 2006 [142] zu finden.

8.2.4.3 Kritische Betrachtung

Die Anwendung klassischer statistischer Tests setzt das Vorliegen einer Normalverteilung voraus. Diese liegt streng genommen jedoch nie vor (vgl. SACHS & HEDDERICH 2006 [142]). Zudem existieren keine eindeutigen Kriterien für eine Ja-/Nein-Entscheidung, ob die Voraussetzung der Normalverteilung erfüllt, oder nicht erfüllt ist. Jeder Test weist Stärken und Schwächen auf (vgl. ÖZTUNA et al. 2006 [130], RAZALI & WAH 2011 [137]). In Abhängigkeit der exakten Beschaffenheit einer Stichprobe und der Auswahl des verwendeten Tests, fallen die Ergebnisse durchaus unterschiedlich aus.

JANSSEN & LAATZ 2013 [87] weisen darauf hin, dass ein Schwachpunkt bei Normalverteilungstests darin besteht, dass eine Nullhypothese überprüft wird. Deshalb müsste eigentlich β und nicht α zur Bestimmung des Signifikanzniveaus benutzt werden. Erfolgt dies nicht, da es nicht möglich ist, wird die zu prüfende Hypothese umso eher bestätigt, je kleiner die Stichprobengröße n ist. Aus diesem Grund raten die Autoren von einer allzu schematischen Anwendung der Normalverteilungstests ab. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ ohnehin bei 5 % der Testergebnisse ein nicht korrektes Ergebnis in Kauf genommen wird (α -Fehler; Fehler 1. Art).

Die geeignete Auswahl eines Tests und die Interpretation der Daten sollte unter diesen Gesichtspunkten umso mehr mit Sorgfalt erfolgen. Die beschriebenen grafischen Hilfsmittel und Tests geben nur grobe Orientierungen und dienen mit ihrer Einschätzung allenfalls als entscheidungsunterstützend. „Der Anwender ist daher stark auf sein eigenes Urteil und seine Erfahrung angewiesen“, so JANSSEN & LAATZ 2013 [87].

Zudem ist anzumerken, dass die Varianzanalyse auf die Verletzung der Annahme der Normalverteilung (und der Varianzhomogenität) relativ robust reagiert (vgl. PFISTER 2008 [134]).

8.2.5 Prüfung auf Sphärizität (Voraussetzung 5)

Bei der Durchführung einer zweifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung müssen neben der Normalverteilung und der Varianzhomogenität die Varianzen aller möglichen Differenzen gleich sein. Dies wird unter dem Begriff Zirkularität bzw. Sphärizität zusammengefasst (vgl. PFISTER 2008 [134]). Ein geeigneter Test zur Prüfung der Sphärizität, der auch unter SPSS automatisch mit durchgeführt wird, ist Mauchly's Test auf Sphärizität (MAUCHLY 1940 [120]). Dieser Tests weist die Schwäche auf, dass er Abweichungen der Sphärizität bei kleinen Stichprobenumfängen nicht entdeckt. Bei großen Stichprobenumfängen hingegen ist er „überkritisch“. Dennoch gehört dieser Tests zu den weit verbreiteten Standards, nicht zuletzt aufgrund seiner einfachen Interpretierbarkeit und der Einbindung in SPSS (vgl. LUND & LUND 2013 [117]). Grundsätzlich gilt jedoch die gleiche Sorgfalt bezüglich Anwendung und Interpretation dieses Tests wie bei der diskutierten Prüfung auf Normalverteilung.

Mauchly's Test auf Sphärizität prüft bei Vorliegen von mehr als zwei Stufen eines Faktors (unabhängige Variable) die Nullhypothese, dass die Varianzen der Differenzen gleich sind. Für $p < 0,5$ ist der Test signifikant. Die Nullhypothese wird zugunsten der Alternativhypothese verworfen. Die Varianzen der Differenzen wären demnach nicht gleich. In einem solchen Fall muss die Analyse mittels einer ANOVA jedoch nicht abgebrochen werden. Um Abweichungen Rechnung zu tragen, werden Korrekturen verwendet, die die Freiheitsgrade reduzieren und damit die Teststärke abschwächen (vgl. LÜPSEN [118]). Ein nicht allzu konservativer Korrekturfaktor ist das Verfahren nach Greenhouse-Geisser (vgl. GREENHOUSE & GEISSER 1959 [67]). In SPSS werden die entsprechenden Korrekturfaktoren direkt mit ausgegeben.

8.2.6 Bonferroni-Korrektur

Wird innerhalb einer Stichprobe eine Nullhypothese mit k simultanen Signifikanztests mit dem Signifikanzniveau α getestet, so tritt eine Alphafehler-Kumulierung (α -Fehler-Inflation) auf. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese fehlerhaft als korrekt angenommen wird (Fehler 1. Art) steigt. Nach Bonferroni wird das Signifikanzniveau in solchen Fällen auf

$$\alpha_n = \frac{\alpha}{k}$$

Bonferroni-Korrektur 8.2

mit:

α_n korrigiertes Signifikanzniveau
 α gewünschtes Signifikanzniveau
 k Anzahl der getesteten Hypothesen

für die geplante Folge von Tests angepasst (vgl. SACHS & HEDDERICH 2006 [142], BORTZ & LIENERT 2008 [14]). Nur so kann sichergestellt werden, dass der Fehler 1. Art das für das Experiment vorgegebene Signifikanzniveau α nicht überschreitet. Diese Vorgehensweise gilt als sehr konservativ. Verbesserte Verfahren führen BORTZ & SCHUSTER 2010 [15] auf. Anwendung findet dieses Verfahren beispielsweise bei Post-hoc-Tests, bei denen nach einem signifikanten (übergeordneten) Omnibustest einzelne Paarvergleiche innerhalb der untersuchten Gruppe durchgeführt werden.

8.2.7 Rangplatzsummen nach dem Kruskal-Wallis-Test

Der *H-Test nach Kruskal und Wallis* (KRUSKAL & WALLIS 1952 [104]) ist eine verteilungsfreie Alternative der parametrischen Varianzanalyse für mehr als zwei unabhängige Stichproben (vgl. BORTZ & LIENERT 2008 [14]). Anhand von Rangplatzsummen wird überprüft, ob sich die Stichproben in ihrer zentralen Tendenz unterscheiden. Der Test soll im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht zur Signifikanzanalyse verwendet werden. Angelehnt an den Kruskal-Wallis-Test wird jedoch die Vorgehensweise zur Berechnung der Rangplatzsummen verwendet. Die Rangplatzsummen können Aufschluss darüber geben, ob zwischen den untersuchten Probanden eindeutige Unterschiede in ihrer grundlegenden Empfindlichkeit bei der Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle vorhanden sind. Im Beispiel von Tabelle 8.2 wird deutlich, dass Testperson 3 die drei Testbedingungen T_1 - T_3 von der Tendenz her ähnlich wie TP_1 und TP_2 bewertet. Das absolute Niveau (Rangsumme) weicht jedoch deutlich nach unten ab.

Tabelle 8.2: Berechnung der Rangplatzsummen

	T_1	T_2	T_3	Rangplätze ¹⁾			Rangsumme
TP₁	20	16	13	8	6	4	18
TP₂	22	17	14	9	7	5	21
TP₃	9	7	5	3	2	1	6

TP_x – Testperson Nr. X

T_y – Testbedingung Y;

¹⁾ – von der niedrigsten bis höchsten Bewertung (über alle) aufsteigend vergeben

8.2.8 95 %-Konfidenzintervall

Punktschätzer einer Verteilung wie der Mittelwert können von Zufallsstichprobe zu Zufallsstichprobe schwanken. Oft ist es jedoch auch von Interesse, in welchem Bereich ein unbekannter Parameter mit großer Sicherheit vermutet werden darf. Ein solcher Bereich wird *Konfidenzintervall (KI)* genannt (BORTZ & SCHUSTER 2010 [15]). In der Regel wird das $(1 - \alpha)$ -Konfidenzintervall verwendet – im vorliegenden Fall also das 95 %-Konfidenzintervall. Auf die vorliegende Untersuchung bezogen bedeutet dies, dass die gesuchte Wahrnehmungsschwelle mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % in dem angegebenen Wertebereich liegt. Die Grenzen des Bereiches werden auf Basis der zugrunde gelegten Standardnormalverteilung berechnet – eine normalverteilte Stichprobenverteilung vorausgesetzt. Die Grenzen des Konfidenzintervalls legen auch die Toleranzen für mögliche Werte einer kritischen Untergrenze der Wahrnehmungsschwelle auf Grundlage der Labordaten fest. Gleichung 8.3 zeigt die Berechnung des KI aus der Student-Verteilung bei unbekannter Varianz der Grundgesamtheit.

$$KI = \bar{x} \pm t_{n-1; 1-\frac{\alpha}{2}} \cdot SE = \bar{x} \pm t_{n-1; 1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Konfidenzintervall} \quad 8.3$$

mit:

\bar{x} Mittelwert der Stichprobe

t Quantil der t – Verteilung für gewünschtes Signifikanzniveau

SE Standardfehler (Standardabweichung s; Stichprobengröße n)

9 Ergebnisse der statistischen Analyse

Entsprechend der für die Anwendung einer zweifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung in Abschnitt 8.2.2 (S. 84) beschriebenen Anforderungen 3) - 5) werden nachfolgend die Ergebnisse der Überprüfung dargestellt.

9.1 Prüfung auf Ausreißer (Voraussetzung 3)

Für die Analyse der erhobenen Daten auf Ausreißer wurden sowohl Boxplots erzeugt, als auch die Analyse mit Hilfe der studentisierten Residuen durchgeführt. Auf eine ausführliche Darstellung der Boxplots wird an dieser Stelle verzichtet. Sie sind in Anhang A1 (S. 136) enthalten.

Alle Werte in den studentisierten Residuen liegen innerhalb des Bereiches von - 3,089 bis + 3,089. Mit dieser Methode konnten keine Werte als Ausreißer identifiziert werden.

9.2 Prüfung auf Normalverteilung (Voraussetzung 4)

Die Prüfung auf Vorliegen normalverteilter Daten wurde in zweifacher Hinsicht durchgeführt. Einerseits wurde geprüft, ob die drei durchgeführten Wiederholungen je Testperson und Testbedingung normalverteilt sind (intraindividuelle Prüfung). Andererseits wurde geprüft, ob die Werte zwischen den untersuchten Testpersonen normalverteilt sind (interindividuelle Prüfung).

9.2.1 Intraindividuelle Prüfung auf Normalverteilung

Zur Prüfung der intraindividuellen Normalverteilung der Daten wurden für die ausgewählten Wellenlängen $\lambda_s = 440 \text{ nm}$, 530 nm und 640 nm jeweils 10 Wiederholungen der Schwellenermittlung für eine Testperson durchgeführt (vgl. Abbildung 7.7, S. 69). Die Prüfung mittels des Shapiro-Wilk-Tests ergibt, dass die erhobenen Daten für alle drei Wellenlängen normalverteilt sind ($p > 0,05$). Auf Basis dieser Stichprobe wird im weiteren Verlauf davon ausgegangen, dass dies für alle Testpersonen und Parameterkombinationen gilt.

Die Boxplots sowie die Q-Q-Plots zeigt Anhang A2 auf S. 138.

9.2.2 Interindividuelle Prüfung auf Normalverteilung

Für die interindividuelle Prüfung auf Normalverteilung wurden die studentisierten Residuen für jede getestete Parameterkombination mittels des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung geprüft. Anhang A3 (S. 139) zeigt die Übersicht der Ergebnisse. Die Normalverteilung ist nach dieser Prüfung nicht für alle Bedingungen gegeben. Unter Verweis auf die Diskussion in Abschnitt 8.2.4.3 (S. 89) wird nachfolgend die Voraussetzung der Normalverteilung für alle Parameterkombinationen angenommen.

Abbildung 9.1 zeigt exemplarisch das Q-Q-Plot für die Bedingung $\theta = 2,65^\circ$, HAL, $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ bei $\lambda_s = 652 \text{ nm}$ für alle zehn getesteten Personen. Es wird deutlich, dass die Daten nicht gravierend von der Normalverteilung abweichen.

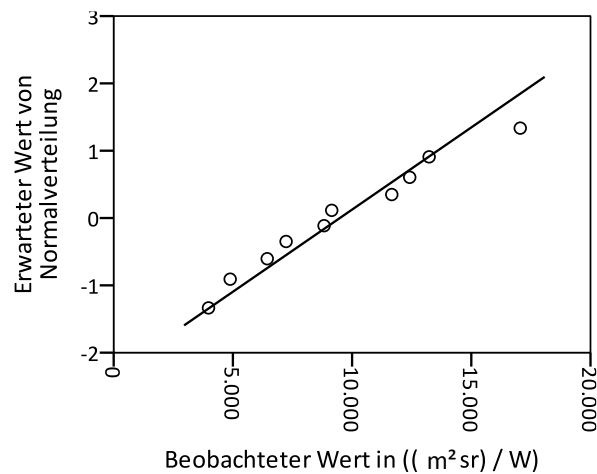


Abbildung 9.1: Q-Q-Plot für $\theta = 2,65^\circ$, HAL, $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ bei $\lambda_s = 652 \text{ nm}$

9.3 Prüfung auf Sphärizität (Voraussetzung 5)

Für die Parameterkombinationen $\theta = 2,65^\circ/L_U = 1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, $2,65^\circ/0,1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, $10^\circ/1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ und die Bedingung $10^\circ/0,1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ wurde in Kombination mit der zweifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung jeweils ein Test auf Sphärizität nach Mauchly durchgeführt. Die folgende Übersicht in Tabelle 9.1 zeigt die Ergebnisse des Tests.

Tabelle 9.1: Übersicht der Testergebnisse auf Sphärizität

Beobachtungswinkel θ	Adaptationsleuchtdichte L_U	Mauchly Test (p-Wert)	Handlung
$2,65^\circ$	$1,0 \text{ cd/m}^2$	0,038	Korrektur ¹⁾
$2,65^\circ$	$0,1 \text{ cd/m}^2$	0,771	-
10°	$1,0 \text{ cd/m}^2$	0,046	Korrektur ¹⁾
10°	$0,1 \text{ cd/m}^2$	0,940	-

¹⁾ nach Greenhouse-Geisser

Für den Fall, dass Mauchly's Test auf Sphärizität signifikant ist ($p < 0,05$), wird die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese verworfen. Das bedeutet, dass die Varianzen der Differenzen nicht gleich sind und die Bedingung der Sphärizität verletzt ist. Es muss ein Korrekturfaktor verwendet werden – in diesem Fall nach Greenhouse-Geisser (vgl. Abschnitt 8.2.5, S.90). Anhang A4 (S. 140) zeigt die vollständigen Ergebnisse des Tests.

9.4 Zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung

Abbildung 9.2 zeigt die ermittelten mittleren Wahrnehmungsschwellen für alle untersuchten Parameterkombinationen im Überblick. Für die Berechnung wurden die Inversen der ermittelten Schwellenstrahldichten über alle Testpersonen gemittelt. Diese Daten dienen als Grundlage für die durchgeführten Signifikanztests.

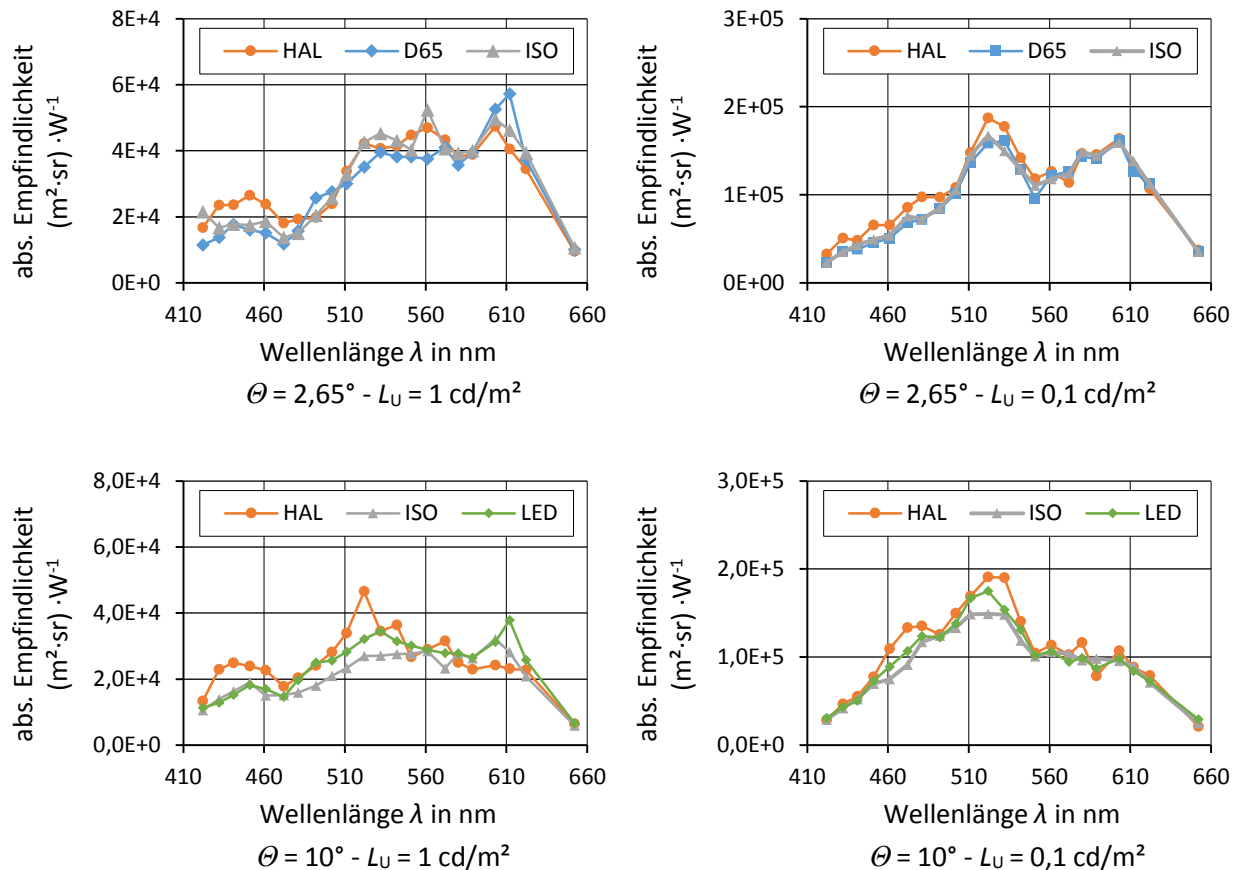


Abbildung 9.2: Über alle Testpersonen gemittelte spektrale Empfindlichkeiten aufgetragen über dem Beobachtungswinkel Θ und der Adaptationsleuchtdichte L_U

Parallel zur Prüfung auf Sphärizität wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für alle untersuchten Parameterkombinationen durchgeführt. Tabelle 9.2 zeigt die Ergebnisse der analysierten Interaktionen und Haupteffekte auf Basis der von SPSS berechneten Innersubjekteffekte (vgl. Anhang A5.1, S. 141).

Für die Parameterkombinationen $\Theta = 2,65^\circ / L_U = 1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$, $2,65^\circ / 0,1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$, $10^\circ / 1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ wird deutlich, dass keine signifikante Interaktion zwischen den beiden untersuchten Faktoren Adaptationsspektrum (Hintergrund) und Objektspektrum (Filterwellenlänge) festgestellt werden kann. Eine signifikante Interaktion ist nur für $\Theta = 10^\circ / L_U = 0,1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ zu beobachten.

Tabelle 9.2: Übersicht der Testergebnisse der ANOVA

Beobachtungswinkel θ	Adaptationsleuchtdichte L_U	Signifikante Interaktion (p-Wert)	Erforderliche Handlung
2,65°	1,0 cd/m ²	nein ($p = 0,188^{1)}$)	Haupteffekte analysieren
2,65°	0,1 cd/m ²	nein ($p = 0,799$)	Haupteffekte analysieren
10°	1,0 cd/m ²	nein ($p = 0,084^{1}$)	Haupteffekte analysieren
10°	0,1 cd/m ²	ja ($p = 0,000$)	einfache Haupteffekte prüfen (Post-hoc-Test)

¹⁾ nach Greenhouse-Geisser

Während für eine genauere Analyse der ersten drei Bedingungen die Haupteffekte aus der Berechnung der ANOVA herangezogen werden können, muss für die Bedingung $\theta = 10^\circ / L_U = 0,1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ in Post-hoc-Tests eine Berechnung der einfachen Haupteffekte erfolgen.

9.4.1 Analyse der Haupteffekte

Das Ergebnis der analysierten Haupteffekte zeigt Tabelle 9.3 (vgl. Anhang A5.1, S. 141).

Tabelle 9.3: Übersicht der Testergebnisse der Haupteffekte der ANOVA

Beobachtungswinkel θ	Adaptationsleuchtdichte L_U	Haupteffekt für das Adaptationsspektrum (p-Wert)	Haupteffekt für das Objektspektrum (p-Wert)
2,65°	1,0 cd/m ²	nein ($p = 0,442^{1)}$)	ja ($p = 0,000$)
2,65°	0,1 cd/m ²	nein ($p = 0,073$)	ja ($p = 0,000$)
10°	1,0 cd/m ²	nein ($p = 0,197^{1}$)	ja ($p = 0,000$)

¹⁾ nach Greenhouse-Geisser

Für alle drei geprüften Bedingungen wird deutlich, dass das Adaptationsspektrum L_U (HAL, D65, ISO, LED) keinen signifikanten Einfluss auf die Wahrnehmungsschwelle des Objektes hat. Das Objektspektrum ($422 \text{ nm} < \lambda_s < 652 \text{ nm}$) hingegen hat für alle drei Parameterkombinationen einen signifikanten Einfluss auf die ermittelte Wahrnehmungsschwelle. Dies bestätigt die seit den Anfängen der visuellen Wahrnehmungsforschung bekannte spektrale Abhängigkeit des menschlichen Seh-sinnes.

9.4.2 Einfache Haupteffekte (Post-hoc-Tests)

Aufgrund der signifikanten Interaktion für die Bedingung $\theta = 10^\circ / L_U = 0,1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ wurden die einfachen Haupteffekte für die Faktoren Adaptationsspektrum und Objektspektrum analysiert (vgl. Abschnitt 8.2.1.2, S. 84).

9.4.2.1 Einfacher Haupteffekt für das Objektspektrum

Für alle 3 Adaptationsspektren ist bei $\theta = 10^\circ/L_U = 0,1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ein signifikanter Einfluss des Objektspektrums (Wellenlänge) auf die Wahrnehmungsschwelle feststellbar ($p < 0,0005$). Das entspricht den Ergebnissen aus Abschnitt 9.4.1.

9.4.2.2 Einfacher Haupteffekt für das Adaptationsspektrum

Tabelle 9.4 zeigt die Ergebnisse der Analyse des einfachen Haupteffektes für das Adaptationsspektrum. Aufgeführt sind nur diejenigen Filterwellenlängen, bei denen mittels einer einfachen ANOVA ein signifikanter Unterschied zwischen den Werten von HAL, ISO und LED als Gruppe zu beobachten war (übergeordnete Signifikanz). In diesen Fällen wurde zusätzlich ein anschließender Paarvergleich mit Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Die Spalten für den paarweisen Vergleich in Tabelle 9.4 zeigen auf, zwischen welchen Adaptationsspektren die signifikanten Unterschiede im Detail vorhanden sind.

Tabelle 9.4: Wellenlängen mit signifikanten Unterschieden zwischen den Adaptationsspektren

λ_s in nm	Übergeordnete Signifikanz (p-Wert)	Paarweise Vergleiche	
		ISO - HAL	ISO - LED
461	0,003	0,021	0,044
472	0,037	– ¹⁾	– ¹⁾
502	0,021	0,019	– ¹⁾
511	0,008	– ¹⁾	0,032
522	0,017	0,018	– ¹⁾
532	0,002	0,006	– ¹⁾
542	0,019	– ¹⁾	– ¹⁾

¹⁾ in den paarweisen Vergleichen wurden hier keine signifikanten Unterschiede festgestellt

Zusammen mit Abbildung 9.2 auf S. 94 (unten rechts) wird deutlich, dass es zwei Abschnitte im Spektralbereich gibt, bei denen für $\theta = 10^\circ$ und $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ signifikante Unterschiede zwischen den drei Adaptationsspektren vorhanden sind.

- $\lambda_s = 461 \text{ nm}$: HAL > ISO und LED > ISO
- Bereich $\lambda_s = 502 \text{ nm} - 532 \text{ nm}$: HAL > ISO bei 502 nm, 511 nm und 522 nm sowie LED > ISO bei 511 nm

Bei $\lambda_s = 472 \text{ nm}$ und 542 nm wurde zwar eine übergeordnete Signifikanz ermittelt, jedoch ergaben die Paarvergleiche mit Bonferroni-Korrektur keine signifikanten Unterschiede mehr.

Die vollständigen Ergebnisse der Analyse des einfachen Haupteffekts für das Adaptationsspektrum sind in Tabelle in Anhang A5.2 (S. 144) zu finden.

9.5 Interindividuelle Unterschiede

Die Variation der ermittelten Wahrnehmungsschwellen von Person zu Person wird nachfolgend mit Hilfe der Rangplatzsummen (vgl. Abschnitt 8.2.7, S. 91) und des 95 %-Konfidenzintervalls dargestellt.

9.5.1 Rangplatzsummen nach Kruskal-Wallis

Tabelle 9.5 zeigt für alle untersuchten Parameterkombinationen die mit fortlaufenden Nummern codierten Probanden. Je weiter unten eine Probandennummer in der Tabelle steht, umso empfindlicher ist sie bei der entsprechenden Schwellenermittlung gewesen. Beispielsweise ist die Testperson mit der Nummer 7 für den Beobachtungswinkel $\theta = 10^\circ$ bei allen Bedingungen am unempfindlichsten. Ähnliche Tendenzen lassen sich für die anderen Bedingungen aufzeigen.

Tabelle 9.5: Empfindlichkeit der einzelnen Probanden anhand der Rangplatzsummen

		$\theta = 2,65^\circ$						$\theta = 10^\circ$					
		HAL 1,0 ¹⁾	HAL 0,1	ISO 1,0	ISO 0,1	D65 1,0	D65 0,1	HAL 1,0	HAL 0,1	ISO 1,0	ISO 0,1	LED 1,0	LED 0,1
Empfindlichkeit	niedrig	13 ²⁾	5	13	13	5	5	7	7	7	7	7	7
		5	13	5	5	13	13	5	5	2	2	2	5
		7	7	7	7	7	7	2	2	3	1	10	2
		10	1	2	1	10	1	3	6	10	3	5	3
		2	10	1	2	2	10	10	9	5	9	3	8
		9	2	10	10	1	2	6	3	1	6	6	9
		3	4	9	11	9	3	1	1	6	10	9	6
		1	3	4	3	3	9	9	12	12	12	1	12
		4	9	3	4	4	11	8	10	9	14	8	1
		11	11	11	9	11	4	12	8	14	8	12	10
hoch		-	-	-	-	-	-	14	14	8	-	14	14
UF		3,18 ³⁾	2,38	3,07	2,50	2,76	2,65	5,97	2,84	7,47	3,62	5,12	3,00

¹⁾ Adaptationsleuchtdichte L_U in cd/m^2

²⁾ Nummer der Testperson (1 - 14)

³⁾ UF = Rangplatzsumme empfindlichste Testperson / Rangplatzsumme der unempfindlichsten Testperson

Die letzte Zeile in Tabelle 9.5 zeigt die Berechnungsergebnisse des Unterschiedsfaktors UF nach Gleichung 9.1. Je größer der UF, umso mehr liegen die empfindlichste und unempfindlichste Testperson bei einer untersuchten Bedingung auseinander. Die ermittelten Rangplatzsummen als Basis für die Berechnung des UF zeigt Anhang A6 auf S. 145.

$$UF = \frac{\text{Rangplatzsumme der empfindlichsten Testperson}}{\text{Rangplatzsumme der unempfindlichsten Testperson}}$$

Unterschieds-
faktor 9.1

9.5.2 95 %-Konfidenzintervall

Abbildung 9.3 zeigt erneut die Mittelwertdiagramme der spektralen Empfindlichkeiten aus Abbildung 9.2 auf S. 94. Eingezeichnet sind jeweils die berechneten 95 %-Konfidenzintervalle (KI) für das Adaptationsspektrum HAL. Auf die Darstellung der Konfidenzintervalle der anderen Spektren wird aus Gründen der Übersichtlichkeit an dieser Stelle verzichtet.

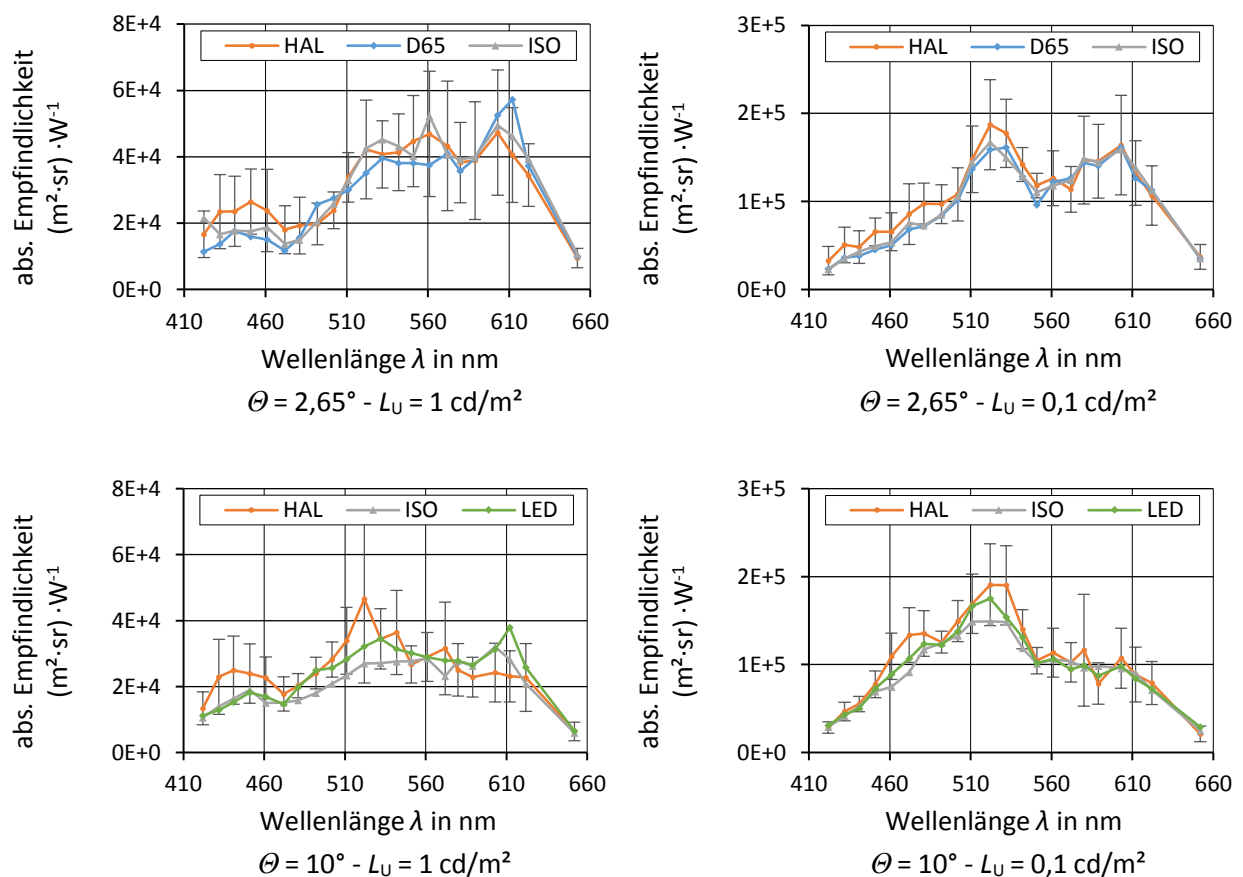


Abbildung 9.3: Gemittelte spektrale Empfindlichkeiten mit 95 %-KI für HAL aufgetragen über dem Beobachtungswinkel Θ und der Adaptationsleuchtdichte L_U

10 Diskussion der Ergebnisse

In den nachfolgenden Abschnitten wird eine Betrachtung der Ergebnisse durchgeführt. Es werden mögliche Ursachen diskutiert und Vergleiche mit Ergebnissen aus der Literatur herangezogen.

10.1 Interindividuelle Unterschiede

Sinneswahrnehmungen liefern selbst bei Darbietung konstanter Reize nur selten konstante Empfindungen. Zudem sind die Empfindungen von Mensch zu Mensch unterschiedlich ausgeprägt. Auf das visuelle System bezogen ist bereits die Topologie der Netzhaut mit der vorhandenen Rezeptordichte von Person zu Person zum Teil stark verschieden (vgl. Abschnitt 2.2.5, S. 24).

Analysiert man die ermittelten Wahrnehmungsschwellen nach der in Abschnitt 8.2.7 auf S.91 beschriebenen Vorgehensweise der Rangplatzsummen, so wird diese Beobachtung bestätigt. Es fällt auf, dass die Rangplatzsummen nicht zufällig variieren. Es sind in den meisten Fällen dieselben Testpersonen, die sehr niedrige bzw. hohe Wahrnehmungsschwellen aufweisen, unabhängig von der gewählten Parameterkombination (vgl. Tabelle 9.5, S. 97). Neben nicht vermeidbaren natürlichen Unterschieden zwischen den Wahrnehmungsschwellen der Testpersonen, kann auch die verwendete Testmethodik einen Einfluss auf die Unterschiede ausüben. Wie in Abschnitt 7.2.5 (S. 74) beschrieben, setzt die verwendete Ja-/Nein-Methodik immer ein stabiles Antwortkriterium bei den Testpersonen voraus. Ist dies in der Praxis nicht gegeben, so wird auch immer die Bereitschaft zum Antworten mit erfasst. Hinzu kommt, dass die Methode der Wahrnehmungsschwelle in sich höhere Streuungen aufweist (vgl. GERDES 1979 [59]), als das beispielsweise für Verfahren auf Basis der Wahrnehmungsgeschwindigkeit (Flimmerprinzip) der Fall ist (vgl. ENDERS 1995 [50]).

Abbildung 10.1 zeigt die anhand der Rangplatzsummen in Abschnitt 9.5.1 (S. 97) berechneten Unterschiedsfaktoren UF.

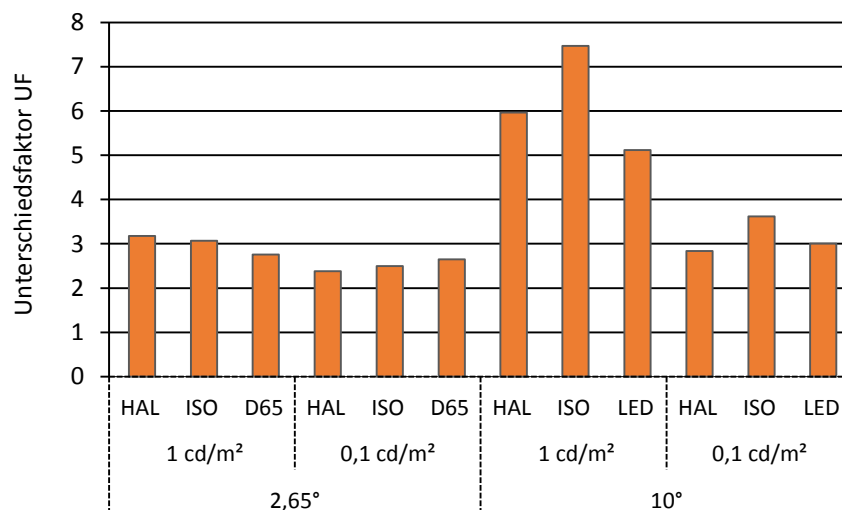


Abbildung 10.1: Unterschiedsfaktoren UF anhand der Rangplatzsummen für alle untersuchten Bedingungen (Spektrum, θ , L_v)

Sie stellen die Division der Rangplatzsumme der empfindlichsten zur unempfindlichsten Person für jede untersuchte Bedingung dar. Es wird deutlich, dass der UF für alle 12 ermittelten Wahrnehmungsschwellen den Wert 2 überschreitet. Die empfindlichste Person ist in ihrer absoluten Wahrnehmungsschwelle demnach mindestens doppelt so empfindlich wie die unempfindlichste Person. Als weitere Tendenz ist erkennbar, dass der UF unter sonst konstanten Bedingungen bei $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ immer höhere Werte als bei $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ annimmt. Bei einem Beobachtungswinkel von $\theta = 10^\circ$ nimmt der UF für beide Adaptationsleuchtdichten größere Werte an, als das für $\theta = 2,65^\circ$ der Fall ist. Die höchsten interindividuellen Unterschiede werden für $\theta = 10^\circ$ und $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ erreicht. Hier ist die empfindlichste Testperson mehr als sieben Mal so empfindlich wie die unempfindlichste Person. Ein möglicher Grund für diese hohen Werte bei $\theta = 10^\circ$ ist die Verteilung der Empfänger auf der Netzhaut. Bei diesem Winkel sind vorwiegend die Stäbchen angesiedelt (vgl. Abbildung 2.3, S. 7), die eine deutlich höhere Empfindlichkeit aufweisen, als die Farbrezeptoren (Zapfen). Durch das nichtlineare Verhalten fallen Unterschiede in der Empfindlichkeit deshalb stärker ins Gewicht.

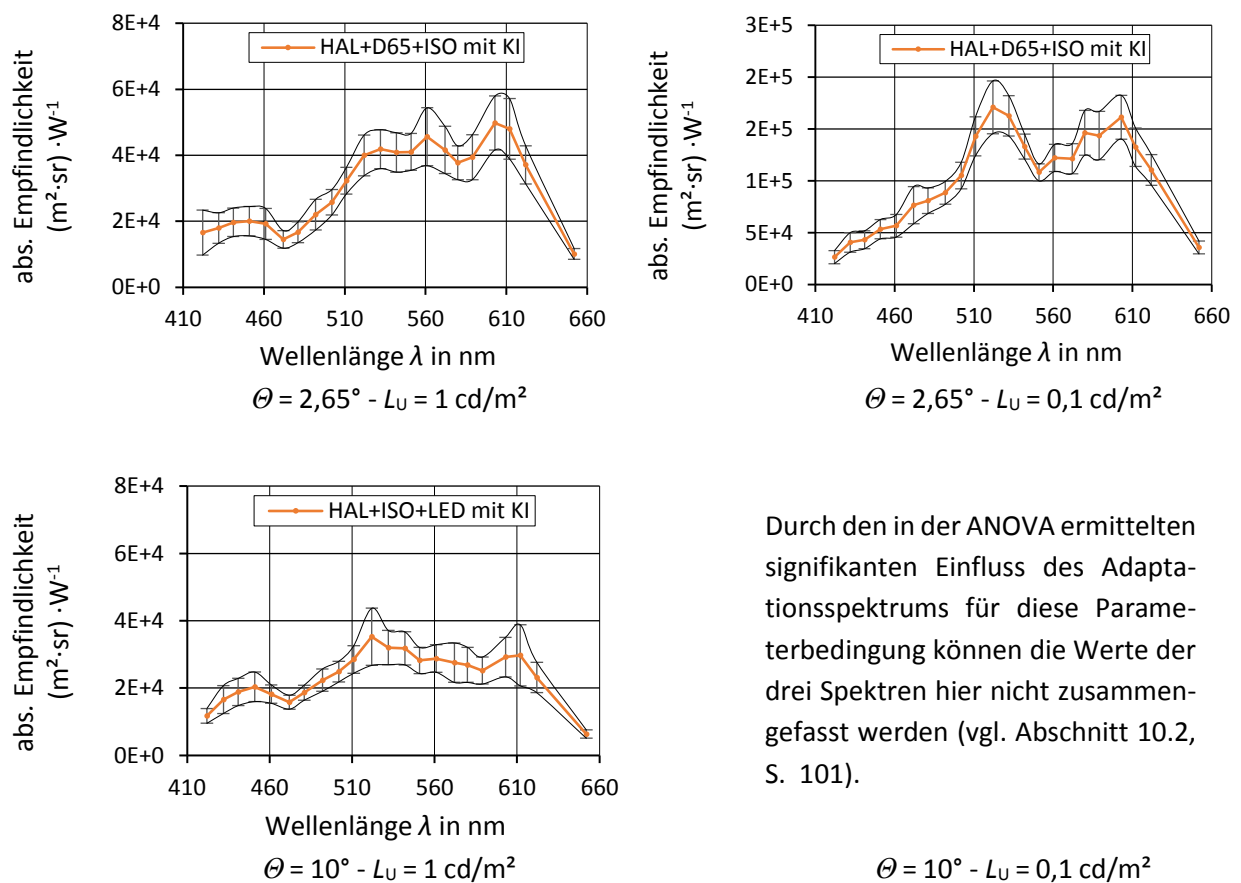


Abbildung 10.2: Absolute spektrale Empfindlichkeiten mit 95 %-KI für das HAL-Spektrum gemittelt über alle drei Adaptationsspektren, da kein signifikanter Unterschied zwischen ihnen vorhanden ist; gegliedert nach dem Beobachtungswinkel θ und der Adaptationsleuchtdichte L_U

Um aus den ermittelten Wahrnehmungsschwellen mögliche kritische Grenzwerte für die Detektierbarkeit von Objekten festlegen zu können, ist eine Betrachtung der ungünstigsten Umstände erforderlich. Dies bedeutet, dass die Grenzwerte so ausfallen müssen, dass selbst die unempfindlichen Personen das relevante Objekt wahrnehmen können. Zu diesem Zweck ist es hilfreich, die 95 %-Konfidenzintervalle (KI) mit deren Untergrenzen zu betrachten. Die Analyse der Daten mit Hilfe der zweifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung hat ergeben, dass bis auf die Bedingung $\theta = 10^\circ$ und $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ kein signifikanter Einfluss des Adaptationsspektrums erkennbar ist.

Im Gegensatz zu der Darstellung in Abbildung 9.3 auf S. 98 können deshalb für die Parameterkombinationen $(\theta = 2,65^\circ, L_U = 1 \text{ cd/m}^2)$, $(\theta = 2,65^\circ, L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2)$ und $(\theta = 10^\circ, L_U = 1 \text{ cd/m}^2)$ jeweils die absoluten spektralen Empfindlichkeiten für alle drei Adaptationsspektren zusammengefasst werden. Auf Basis dieser Daten werden anschließend die Konfidenzintervalle berechnet. Abbildung 10.2 zeigt die daraus resultierenden Diagramme. Die tabellierten Werte sind in Anhang B (S. 147) enthalten.

10.2 Einfluss des Adaptationsspektrums $L_{eU}(\lambda)$

Eine bedeutende Fragestellung im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist der Einfluss des Adaptationsspektrums $L_{eU}(\lambda)$ auf die spektrale Empfindlichkeit an der Wahrnehmungsschwelle des Objektes. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 10.3 die abstrahierte Darstellung eines gerade wahrnehmbaren Objektes mit seiner spektralen Strahldichte $L_{eO}(\lambda)$.

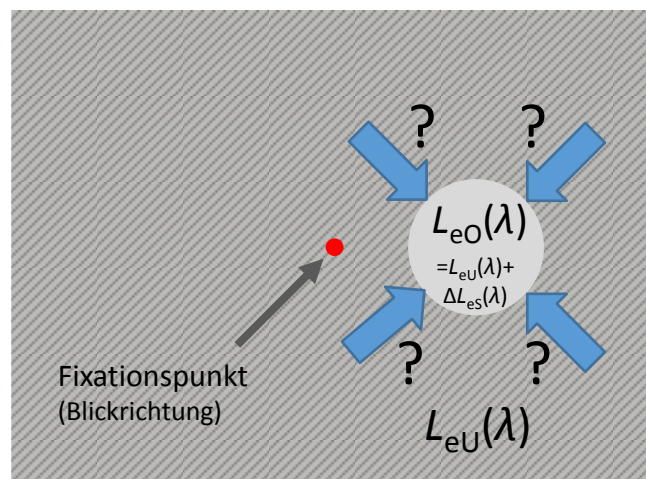


Abbildung 10.3: Schwelleninkrement auf homogenem Hintergrund

$\Delta L_{eS}(\lambda)$: Spektrum des Inkrements = verwendeter Interferenzfilter
(spektrale Mischung aus Objekt- und Adaptationsspektrum)

$L_{eU}(\lambda)$: Adaptationsspektrum = LED-Hintergrundbeleuchtung

Dargestellt wird es auf einem Hintergrund (Umfeld) mit seiner spektralen Zusammensetzung $L_{eU}(\lambda)$. Das Objekt wird über den Digitalprojektor erzeugt und sein Spektrum kann anhand der Interferenz-

filter verändert werden. Das Adaptationsspektrum hingegen wird mit der LED-Hintergrundbeleuchtung erzeugt. Dabei ist das dargestellte Objekt immer ein Inkrement auf dem Hintergrund. Sobald die Wahrnehmungsschwelle überschritten ist, kann das Objekt aufgrund seines Positivkontrastes – ein helles Objekt auf einem dunkleren Hintergrund – detektiert werden. An der Stelle des Objektes tritt nach Gleichung 2.3 (S. 19) ein Mischspektrum aus Hintergrund- und Objektspektrum auf. Übertragen auf Abbildung 10.3 lautet die Fragestellung: „Hat die Veränderung der spektralen Zusammensetzung des Adaptationsspektrums $L_{eU}(\lambda)$ bei gleichbleibender Leuchtdichte L_U einen Einfluss auf die spektrale Empfindlichkeit an der Wahrnehmungsschwelle (Detektion) des Objektes mit den spektralen Eigenschaften $L_{eO}(\lambda)$?“

10.2.1 Ergebnisse der ANOVA

Betrachtet man die Ergebnisse der durchgeführten zweifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung, so werden die folgenden beiden Ergebnisse deutlich:

- Für die Parameterkombinationen $\theta = 2,65^\circ/L_U = 1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, $2,65^\circ/0,1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, $10^\circ/1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ kann kein Einfluss der spektralen Zusammensetzung des Hintergrunds (Adaptation) auf die ermittelte Wahrnehmungsschwelle (Detektion) des Objektes festgestellt werden (vgl. Abschnitt 9.4.1, S. 95).
- Für $\theta = 10^\circ/L_U = 0,1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ zeigt sich, dass für die Filterwellenlänge $\lambda_S = 461 \text{ nm}$ und den Bereich zwischen 502 nm und 532 nm signifikante Einflüsse erkennbar sind (vgl. Abschnitt 9.4.2.2, S. 96). Auf diese soll nachfolgend genauer eingegangen werden.

10.2.2 Detaillierte Analyse für $\theta = 10^\circ$; $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$

Abbildung 10.4 zeigt eine vergrößerte Ansicht der Bereiche, in denen ein statistisch signifikanter Einfluss des Adaptationsspektrums auf die Wahrnehmungsschwelle gefunden wurde.

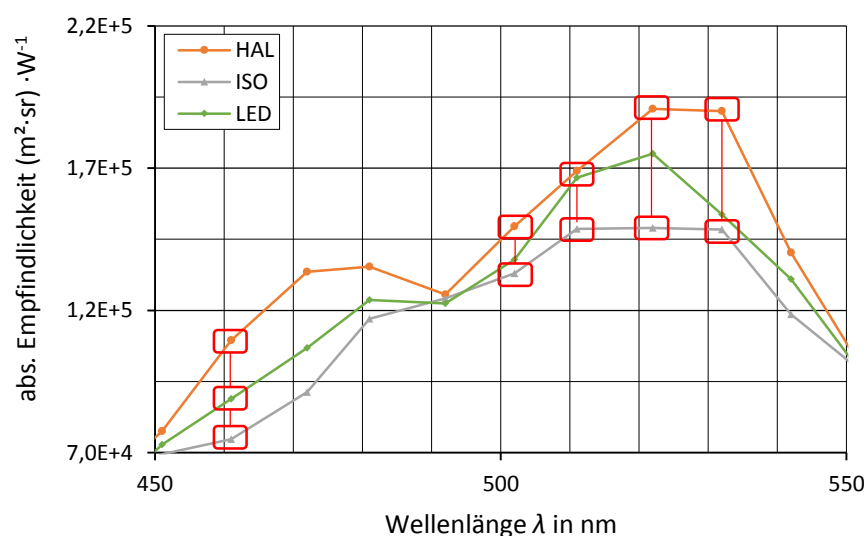


Abbildung 10.4: Mittlere spektrale Empfindlichkeiten für $\theta = 10^\circ$; $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ mit vergrößerten Ausschnitten für die signifikanten Bereiche (rote Rahmen)

Die Paarungen der mittleren Wahrnehmungsschwellen sind für die relevanten Wellenlängen rot eingerahmt. Berechnet man aus den mittleren spektralen Empfindlichkeiten der Adaptationsspektren HAL, ISO und LED für jede der signifikanten Paarungen die Verhältnisse zueinander, so ergeben sich die aufgeführten Unterschiedsfaktoren (UF) in Tabelle 10.1. Für die UF wird immer der größere der beiden Werte durch den Kleineren dividiert. Es wird deutlich, dass die UF je nach Wellenlänge Werte im Bereich zwischen 1,13 und 1,47 annehmen. Dabei fällt auf, dass die mittlere Wahrnehmungsschwelle für das HAL-Spektrum immer über derjenigen des LED-Spektrums liegt. Die spektrale Empfindlichkeit des ISO-Spektrums weist immer die niedrigsten Werte auf.

Tabelle 10.1: Mittlere absolute spektrale Empfindlichkeiten in $(\text{m}^2 \cdot \text{sr})/\text{W}$ für Bereiche mit signifikanten Unterschieden bei $\theta = 10^\circ$, $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$

	$\lambda_s = 461 \text{ nm}$	$\lambda_s = 502 \text{ nm}$	$\lambda_s = 511 \text{ nm}$	$\lambda_s = 522 \text{ nm}$	$\lambda_s = 532 \text{ nm}$
HAL	109.455	149.582	169.065	190.811	190.109
ISO	74.666	132.959	148.659	149.033	148.410
LED	88.897	137.851	166.619	175.108	153.749
UF _{HAL, ISO} ²⁾	1,47	1,13	- ¹⁾	1,28	1,28
UF _{ISO, LED} ²⁾	1,19	- ¹⁾	1,12	- ¹⁾	- ¹⁾

¹⁾ nicht signifikanter Bereich

²⁾ UF : Unterschiedsfaktor = Quotient aus größerem zu kleinerem Wert der abs. spektr. Empfindlk.

Eine naheliegende Annahme für die beobachteten Unterschiedsfaktoren ist die unterschiedlich hohe Strahldichte in den verwendeten Adaptationsspektren HAL, ISO und LED bei den Wellenlängen mit signifikanten Unterschieden zwischen den drei Spektren. Abbildung 10.5 zeigt die spektrale Strahldichtevertelung der drei Spektren HAL, ISO und LED für $\theta = 10^\circ$; $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ mit den rot markierten Bereichen für signifikante Einflüsse des Adaptationsspektrums.

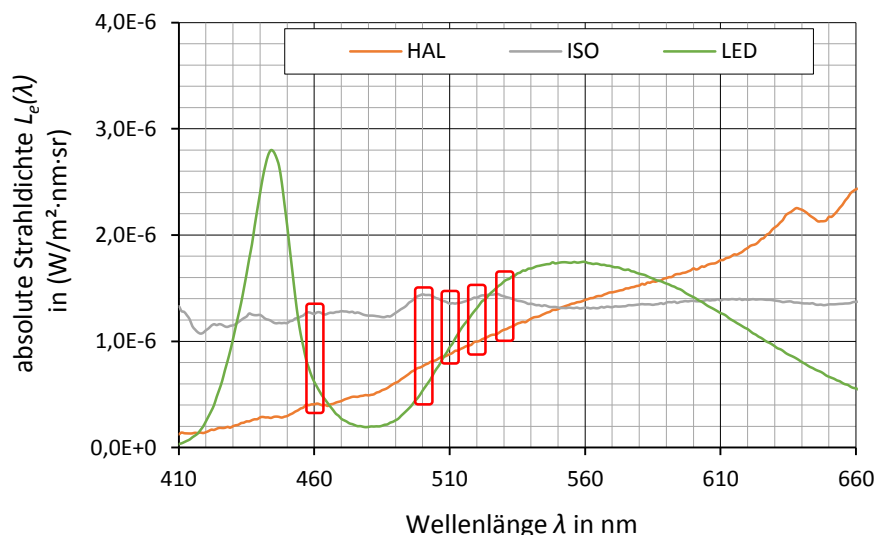


Abbildung 10.5: Absolute spektrale Strahldichte für $\theta = 10^\circ$; $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ für die Adaptationsspektren HAL, ISO, LED

Betrachtet man den grundsätzlichen Verlauf der drei Spektren, so wird deutlich, dass die Strahldichte von HAL für alle fünf untersuchten Wellenlängen aus Tabelle 10.1 immer deutlich unter dem Spektrum von ISO verläuft. Ähnlich verhält es sich für das Spektrum LED. Einzige Ausnahme bildet die Wellenlänge $\lambda_s = 532 \text{ nm}$, an der die Strahldichte von LED über derjenigen des ISO-Spektrums liegt. Bis auf die Wellenlänge $\lambda_s = 502 \text{ nm}$ ist die Strahldichte von HAL kleiner als diejenige des LED-Spektrums.

Um den Einfluss der Strahldichte auf die signifikanten Unterschiede in der Wahrnehmungsschwelle zu analysieren, wurden analog zu Tabelle 10.1 die Unterschiedsfaktoren UF bezüglich der absoluten spektralen Strahldichten der drei Spektren aus Abbildung 10.5 berechnet (vgl. Tabelle 10.2).

Tabelle 10.2: Absol. spektrale Strahldichten in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ und deren Unterschiedsfaktoren (UF) für Bereiche mit signifikanten Unterschieden bei $\theta = 10^\circ$; $L_U = 0,1 \text{ cd}/\text{m}^2$

	$\lambda_s = 461 \text{ nm}$	$\lambda_s = 502 \text{ nm}$	$\lambda_s = 511 \text{ nm}$	$\lambda_s = 522 \text{ nm}$	$\lambda_s = 532 \text{ nm}$
HAL	4,137E-07	7,903E-07	8,896E-07	1,019E-06	1,129E-06
ISO	1,272E-06	1,436E-06	1,359E-06	1,432E-06	1,409E-06
LED	5,715E-07	6,079E-07	9,763E-07	1,378E-06	1,588E-06
Reihenfolge ¹⁾	HAL>LED>ISO	HAL>LED>ISO	HAL>LED>ISO	HAL>LED>ISO	HAL>LED>ISO
Reihenfolge Spektrum ³⁾	ISO>LED>HAL	ISO>HAL>LED	ISO>LED>HAL	ISO>LED>HAL	LED>ISO>HAL
UF _{HAL, ISO}	3,07	1,82	- ²⁾	1,04	1,25
UF _{ISO, LED}	2,23	- ²⁾	1,39	- ²⁾	- ²⁾

¹⁾ spektrale Empfindlichkeit nach Abbildung 10.4, S. 102

²⁾ nicht signifikanter Bereich

³⁾ absolute Strahldichten nach Tabelle 10.1

Zudem wurde überprüft, welchen Einfluss eine niedrige Strahldichte auf die absolute spektrale Empfindlichkeit hat. Dafür wurden die absoluten Strahldichten sowie die ermittelten absoluten spektralen Empfindlichkeiten der Größe nach geordnet (s. „Reihenfolge“ in Tabelle 10.2).

Betrachtet man die nach Größe geordneten Reihenfolgen in Tabelle 10.2, so wird Folgendes für alle Paarungen der Adaptationsspektren mit signifikantem Einfluss auf die absolute spektrale Empfindlichkeit deutlich: eine niedrigere spektrale Strahldichte hat immer eine höhere absolute spektrale Empfindlichkeit zur Folge. Deutlich wird das am Beispiel der Filterwellenlänge $\lambda_s = 461 \text{ nm}$. Die Adaptationsspektren weisen der Größe nach die Reihenfolge ISO>LED>HAL mit dem Verhältnis 1 : 0,45 : 0,33 auf. Die resultierenden absoluten spektralen Empfindlichkeiten an dieser Stelle weisen der Größe nach die umgekehrte Reihenfolge HAL>LED>ISO mit dem Verhältnis 1 : 0,81 : 0,68 auf. Dies gilt übertragen auch für die weiteren Filterwellenlängen.

Dies bestätigt den Einfluss der spektralen Strahldichte auf die absolute spektrale Empfindlichkeit. Eine geringere Strahldichte in den „signifikanten“ Bereichen der Adaptationsspektren hat demnach zur Folge, dass ein Objekt in diesem Spektralbereich früher wahrgenommen wird. Dieser Effekt ist jedoch nicht konstant. Für 461 nm führt die um den Faktor 3,07 höhere Strahldichte (ISO>HAL) zu einer absoluten spektralen Empfindlichkeit, die um den Faktor 1,47 größer ist (HAL>ISO).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich ein signifikanter Einfluss des Adaptationspektrums auf die absolute spektrale Empfindlichkeit der Objektwahrnehmung grundsätzlich nicht bestätigen lässt. Lediglich für die Parameterkombination $\theta = 10^\circ$; $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ ist im Bereich der Empfindlichkeit der Stäbchen zwischen $\lambda_s = 461 \text{ nm}$ und 532 nm (vgl. $V'(\lambda)$ in Abbildung 2.8, S. 16) ein Einfluss erkennbar. Dieser kann auf die unterschiedlich hohen Strahldichten der Spektren HAL, ISO und LED bei den relevanten Filterwellenlängen zurückgeführt werden. Dieser beobachtete Effekt ist auch bei $\lambda_s = 461 \text{ nm}$ vorhanden. FREIDING 2010 [54] erhält ähnliche Resultate, allerdings erst für eine Adaptationsleuchtdichte von $L_U = 0,01 \text{ cd/m}^2$. Er interpretiert diese Beobachtung als eine generelle Verschiebung zur skotopischen Empfindlichkeit hin.

10.3 Einfluss des Objektspektrums $L_{eO}(\lambda)$

Das Objektspektrum $L_{eO}(\lambda)$ ist nicht mit dem Adaptationsspektrum $L_{eU}(\lambda)$ zu verwechseln, welches den Bereich um das Objekt herum spektral charakterisiert (vgl. Abbildung 10.3, S. 101). Bezogen auf Abbildung 10.3 ist ein Einfluss des Objektspektrums dann gegeben, wenn die Änderung der spektralen Zusammensetzung des Objekts $L_{eO}(\lambda)$ durch Wahl eines entsprechenden Interferenzfilters einen signifikanten Einfluss auf die ermittelte Wahrnehmungsschwelle besitzt. Diese Fragestellung ist im vorliegenden Fall jedoch eher akademischer Natur. Die Tatsache, dass der menschliche Sehsinn in seiner Empfindlichkeit eine spektrale Abhängigkeit besitzt, ist seit den Anfängen der visuellen Wahrnehmungsforschung bekannt. Bereits Lambert nutzt und beschreibt in seinem in seinem Grundwerk „Photometrie“ (vgl. LAMBERT 1760 [107]) Instrumente, mit deren Hilfe man „die Helligkeit des Lichts und der Farben in einem gegebenen Verhältniss zu vergrößern und zu verkleinern im Stande ist, bis sie einer gegebenen Helligkeit dem Urtheil des Auges zufolge merklich gleich ist.“ Die hohe Variabilität dieser spektralen Empfindlichkeit in Abhängigkeit der Umfeldbedingungen stellt in der praktischen Anwendung jedoch noch bis heute eine der größten Herausforderungen der Lichttechnik dar.

In Abbildung 9.3 auf S. 98 wird deutlich, dass das Objektspektrum im Gegensatz zum Adaptationspektrum einen maßgeblichen Einfluss auf die Wahrnehmungsschwelle ausübt. Wäre dies nicht gegeben, so würden alle Wahrnehmungsschwellen als Linie parallel zur x-Achse verlaufen. Die durchgeführte zweifaktorielle ANOVA bestätigt in den Ergebnissen die Erwartungen, dass das Objektspektrum einen signifikanten Einfluss auf die Wahrnehmungsschwelle aufweist (vgl. Abschnitte 9.4.1 und 9.4.2 auf S. 95). Dies gilt für alle untersuchten Parameterkombinationen.

An dieser Stelle wird auf weitere Ausführungen verzichtet. Eine Betrachtung der Rezeptorempfindlichkeiten und deren Einfluss auf die spektrale Veränderung der Wahrnehmungsschwelle erfolgt in den weiteren Abschnitten.

10.4 Einfluss der Adaptationsleuchtdichte L_U

In Abschnitt 10.2.2 wurde deutlich, dass der signifikante Einfluss der drei Adaptationsspektren HAL, ISO und LED auf die Wahrnehmungsschwelle auf die Unterschiede in der absoluten spektralen Strahldichte zurückzuführen ist. Betrachtet man unter diesem Aspekt Abbildung 10.5 (S. 103), so ergibt sich die Frage, warum der Unterschied in der spektralen Strahldichte der drei Spektren nicht auch dort einen Einfluss auf die Wahrnehmungsschwelle hat, wo der absolute Unterschied der

Strahldichten am größten ist. Dies wäre bei $\lambda = 444$ nm gegeben, wo der blaue Chip der LED sein Maximum im spektralen Verlauf aufweist. Dieser Peak fällt exakt mit der maximalen Empfindlichkeit der blauen Zapfen zusammen (vgl. Abbildung 2.5, S. 10). Die in Abbildung 9.3 auf S. 98 dargestellten mittleren Wahrnehmungsschwellen machen jedoch deutlich, dass die blauen Zapfen bei einer Adaptationsleuchtdichte von $L_U = 0,1$ cd/m² für beide Beobachtungswinkel θ keinen nennenswerten Beitrag mehr liefern. Die Unterschiede in den Strahldichten der drei Spektren HAL, ISO und LED bleiben deshalb ohne nennenswerten Einfluss auf die Wahrnehmungsschwelle.

Untersuchungen zur spektralen Hellempfindlichkeit bestätigen einen sehr geringen bis keinen Einfluss der S-Zapfen (vgl. VERDON & ADAMS 1987 [170]; EISNER & MACLEOD 1980 [48]). Auch VOS et al. 1990 [174] gehen bei ihren Überlegungen von einem nahezu zu vernachlässigenden Beitrag der kurzwelligen Empfänger aus. Jedoch beruhen die ersten beiden Untersuchungen auf der Flimmerphotometrie, die den Einfluss der S-Zapfen unterdrückt (vgl. KRANDA & KING-SMITH 1979 [102]). Zudem wurde statt der Detektion im mesopischen Bereich die Hellempfindung im photopischen Bereich ermittelt. KOKOSCHKA 1972 [100] hingegen führte Versuche mit der Methode des Direktvergleichs für mesopische Bedingungen durch. Er beobachtete bei den Blauempfängern das auffälligste Verhalten. Mit abnehmender Leuchtdichte steigt deren Reizverhältnis sehr stark an, um dann bei sehr niedrigen Niveaus auszufallen. Als Grenze der Leuchtdichte gibt der Autor einen Wert von 10^{-3} cd/m² an. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit weisen hingegen die Tendenz auf, dass bereits bei 10^{-1} cd/m² bereits kein bzw. ein nicht nennenswerter Einfluss der S-Zapfen auf die absolute spektrale Empfindlichkeit zu erkennen ist.

Anders scheint es hingegen bei einer Adaptationsleuchtdichte von $L_U = 1$ cd/m² zu sein (vgl. Abbildung 9.3, S. 98). Die mittleren spektralen Empfindlichkeiten scheinen hier für das HAL-Spektrum unter beiden Beobachtungswinkeln θ einen höheren Wert gegenüber den anderen beiden Spektren aufzuweisen. Dies würde die zuvor beobachtete Tendenz einer höheren Wahrnehmungsschwelle bei niedrigerer spektraler Strahldichte bestätigen. Die durchgeführte ANOVA weist diese Tendenz jedoch als nicht signifikant aus. Das wird bestätigt, wenn die 95 %-Konfidenzintervalle in Abbildung 9.3 betrachtet werden. Die Streuung der Ergebnisse in diesem Spektralbereich ist zu groß.

Das unterschiedliche Verhalten der blauen Zapfen in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte gilt übertragen auch im weiteren Verlauf des Spektrums für die übrigen Rezeptoren der Netzhaut. Exemplarisch soll der Einfluss der Adaptationsleuchtdichte L_U auf die Wahrnehmungsschwelle im Folgenden am Beobachtungswinkel $\theta = 2,65^\circ$ gezeigt werden.

Abbildung 10.6 stellt die ermittelten mittleren absoluten spektralen Empfindlichkeiten aus Abbildung 10.2 auf S. 100 für den Beobachtungswinkel $\theta = 2,65^\circ$ und die beiden Adaptationsleuchtdichten $L_U = 1$ cd/m² und $0,1$ cd/m² dar. Die drei Adaptationsspektren wurden jeweils zu einer Kurve zusammengefasst, da kein signifikanter Unterschied zwischen ihnen besteht (vgl. Tabelle 9.3, S. 95). Um die Unterschiede in den absoluten Werten in einem gemeinsamen Diagramm verdeutlichen zu können, wurde in diesem Fall eine logarithmische Darstellung gewählt. Links werden die Absolutwerte, rechts die Daten nach Normierung auf den jeweiligen Maximalwert dargestellt.

Es wird deutlich, dass die Adaptationsleuchtdichte zwei erkennbare Auswirkungen auf die absolute spektrale Empfindlichkeit aufweist. Einerseits steigt mit fallendem L_U das absolute Niveau der spektralen Empfindlichkeit. Andererseits ändert sich auch ihr spektraler Verlauf.

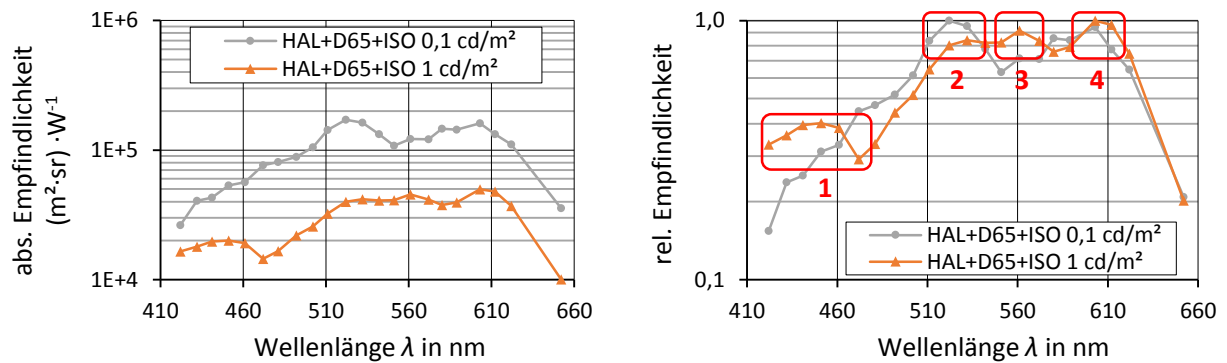


Abbildung 10.6: Mittlere absolute spektrale Empfindlichkeit für $\Theta = 2,65^\circ$ und $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ und $0,1 \text{ cd/m}^2$
 Basis: zusammengefasste Spektren aus Abbildung 10.2, S. 100
 links: Absolutwerte; rechts: Werte normiert auf Maximum
 1..4: Bereiche mit erkennbaren Unterschieden

Wird die Adaptationsleuchtdichte von $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ auf $0,1 \text{ cd/m}^2$ reduziert, so entspricht dies einem Leuchtdichteverhältnis von 10:1. Berechnet man aus Abbildung 10.6 (links) je Wellenlänge die Verhältnisse aus den absoluten Empfindlichkeiten für beide Adaptationsleuchtdichten, so ergibt sich der Verlauf in Abbildung 10.7.

Aufgrund des nichtlinearen Verhaltens des visuellen Systems ergeben sich Faktoren zwischen 1,6 und 5,3. Die größten Änderungen erfolgen im kurzwelligen Bereich zwischen 460 nm und 530 nm.

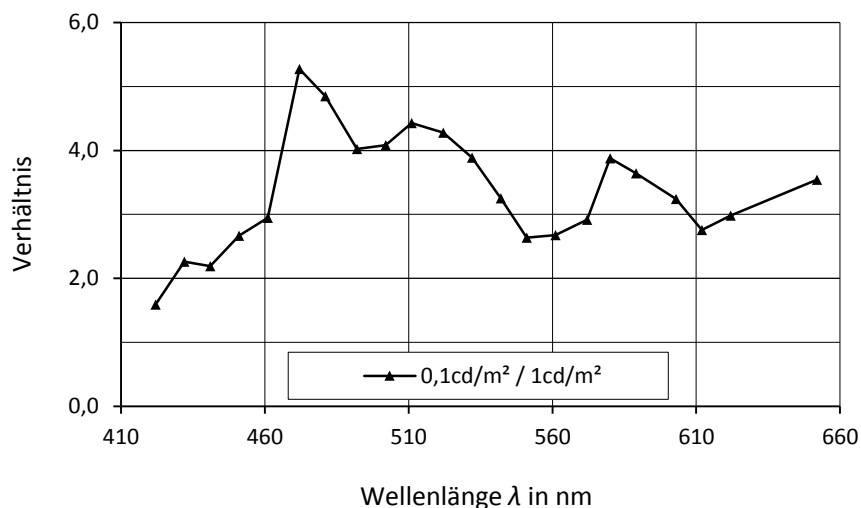


Abbildung 10.7: Verhältnis der absoluten spektralen Empfindlichkeiten für $\Theta = 2,65^\circ$
 Daten aus Abbildung 10.6 (li.); Quotient $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ zu $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$

Abbildung 10.8 zeigt die auf das Maximum skalierten relativen spektralen Empfindlichkeiten für den Beobachtungswinkel $\Theta = 2,65^\circ$ aus Abbildung 10.6 (rechts). Die Grafik wurde um die Rezeptorempfindlichkeiten aus Abbildung 2.3 ergänzt. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden diese Werte auf 40 % des Maximalwertes herabskaliert.

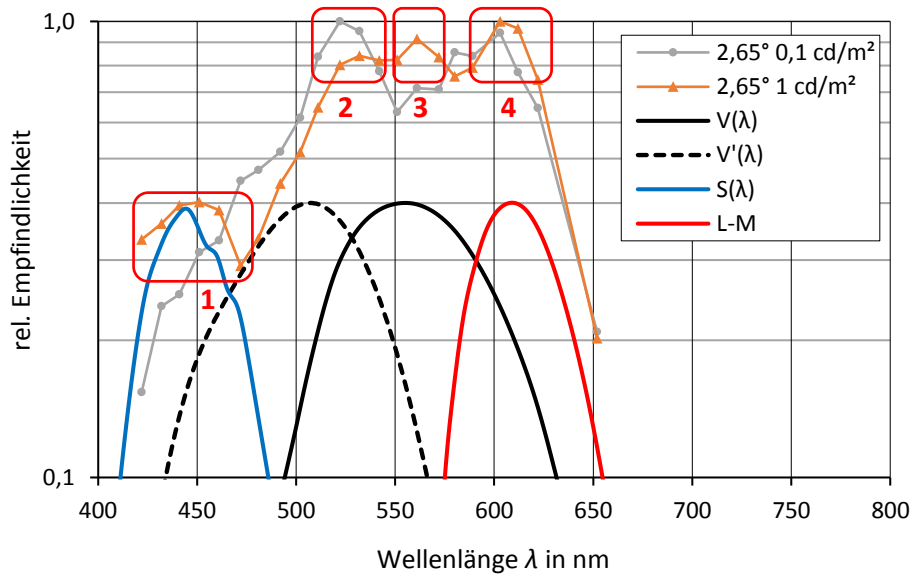


Abbildung 10.8: Mittlere spektrale Empfindlichkeiten und Rezeptorempfindlichkeiten für $\theta = 2,65^\circ$; entspricht Abbildung 10.6 *rechts* ergänzt um skalierte Empfindlichkeiten der Rezeptoren u. chromatischen Mechanismen aus Abbildung 2.3, S. 7

Eine Änderung der Adaptationsleuchtdichte L_U entspricht einer Verschiebung der Arbeitspunkte aller an der visuellen Wahrnehmung beteiligten Rezeptoren und der chromatischen Mechanismen wie (L-M). Ihre Empfindlichkeit ändert sich. Dementsprechend liefern sie einen unterschiedlich hohen Beitrag zur spektralen Empfindlichkeit. Anhand der vier in Abbildung 10.6 und Abbildung 10.8 rot eingerahmten Bereiche lassen sich bei Änderung der Adaptationsleuchtdichte $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ auf $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ für $\theta = 2,65^\circ$ folgende Tendenzen erkennen.

Bereich 1:

Bei $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ ist um 440-450 nm ein ausgeprägtes Maximum zu beobachten. Beim Vergleich mit $S(\lambda)$ fällt auf, dass dieses Verhalten auf die Empfindlichkeiten der S-Zapfen zurückzuführen ist. Für $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ ist dieser Einfluss nicht mehr erkennbar. Die S-Zapfen leisten hier keinen nennenswerten Beitrag zur Wahrnehmung mehr. Das wird auch daran deutlich, dass sich die Kurve bei $0,1 \text{ cd/m}^2$ der Empfindlichkeitsfunktion der Stäbchen $V'(\lambda)$ annähert.

Bereich 2:

Während für $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ ein lokales Maximum bei 530 nm vorliegt, wird dies bei $0,1 \text{ cd/m}^2$ zu einem globalen Maximum um 520 nm. Die maximale Empfindlichkeit der Stäbchen $V'(\lambda)$ liegt bei 507 nm. Dies gilt jedoch streng genommen nur für ein völlig dunkel adaptiertes Auge. Mit abnehmender Adaptationsleuchtdichte L_U verschiebt sich die Empfindlichkeit des visuellen Systems hin zu kürzeren Wellenlängen und umgekehrt.

Dieser Effekt wurde erstmals von Purkinje beschrieben und nach ihm benannt (PURKINJE 1819 [136]). Da das Auge bei $0,1 \text{ cd/m}^2$ nicht völlig dunkel adaptiert ist, ist die Verschiebung des Maximums von 507 nm auf 520 nm nachvollziehbar. Bei weiterer Erhöhung auf $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ verschiebt sich dieses Maximum weiter auf 530 nm, einhergehend mit einer Reduzierung der Empfindlichkeit durch die nachlassende Aktivität der Stäbchen.

Bereich 3:

Für $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ ist um 560 nm ein lokales Maximum erkennbar. Dieses ist durch die Verschaltung der Rezeptoren im mittleren und langwelligen Bereich des Spektrums (L+M) erklärbar (vgl. Abbildung 2.5, S. 10). Die Gesamtempfindlichkeit dieses Kanals entspricht $V(\lambda)$. Mit abnehmender Adaptationsleuchtdichte reduziert sich der Beitrag der Empfänger in diesem Bereich deutlich. Bei $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ entsteht an dieser Stelle ein lokales Minimum.

Bereich 4:

Im langwelligen Bereich ist auffällig, dass ein ausgeprägtes Maximum um $\lambda = 600\text{-}610 \text{ nm}$ vorhanden ist. Dies ist für beide Adaptationsleuchtdichten zu beobachten. Mit abnehmender L_U ist auch hier die leichte Tendenz der Verschiebung hin zu kürzeren Wellenlängen erkennbar.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die beobachteten spektralen Empfindlichkeiten gut durch die bekannten Empfindlichkeiten der Rezeptoren und der chromatischen Mechanismen beschrieben werden können. Mit abnehmender Adaptationsleuchtdichte L_U steigt die absolute Empfindlichkeit des Gesamtsystems. Bei $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ sind die Beiträge der verschiedenen Farbrezeptoren und -kanäle deutlich erkennbar (lokale Maxima; Multipeak-System). Bei Reduzierung auf $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ reduzieren sich diese Beiträge deutlich. Es dominiert die Empfindlichkeit der Stäbchen, kombiniert mit einem Beitrag im langwelligen Bereich (L-M) um $\lambda = 610 \text{ nm}$.

10.5 Einfluss des Beobachtungswinkels θ

Die Ergebnisse der Signifikanzanalyse (vgl. Abschnitt 9.4, S. 94) zeigen, dass die Stäbchen mit ihrer spektralen Empfindlichkeit bei den untersuchten Bedingungen offensichtlich maßgeblich für den Einfluss des Adaptationsspektrums auf die Wahrnehmungsschwelle verantwortlich sind. Die Stäbchen entfalten ihre Aktivität mit abnehmender Adaptationsleuchtdichte L_U . Betrachtet man die Parameterkombination $\theta = 2,65^\circ$ und $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$, so müsste unter diesen Bedingungen ein ähnlicher Einfluss des Adaptationsspektrums auf die Wahrnehmungsschwelle zu beobachten sein, wie das für $\theta = 10^\circ$ und $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ nachgewiesen wurde. Das ist jedoch nicht der Fall.

Da die Adaptationsleuchtdichte für beide Bedingungen identisch ist, kann nur der unterschiedliche Beobachtungswinkel θ der Grund dafür sein. ANSTIS 2002 [5] bestätigt diese Annahme in seinem Artikel. Die als Purkinje-Effekt bekannte Verschiebung der Empfindlichkeit des menschlichen Auges hin zu kürzeren Wellenlängen (blau), erfolgt nicht nur durch den in Abschnitt 10.4 beschriebenen Einfluss der Adaptationsleuchtdichte L_U , sondern auch in einer weiteren Hinsicht: durch einen zunehmenden Beobachtungswinkel θ . Der Grund ist die unterschiedliche Verteilung der Rezeptoren auf der Netzhaut (vgl. Abbildung 2.3, S. 7). Erhöht sich der Beobachtungswinkel θ von $2,65^\circ$ auf 10° , so erhöht sich die Stäbchendichte mit dem Faktor 2,3. Die Anzahl der Farbrezeptoren sinkt hingegen auf etwa 38 % (Werte nach CURCIO et al. 1987 [35]). Mit steigendem Beobachtungswinkel steigt somit die Empfindlichkeit im „blauen“ Spektralbereich linear, während sie mit jeder logarithmischen Dekade an geringerer Adaptationsleuchtdichte L_U um den Faktor 3 wächst (ANSTIS 2002 [5]). Demnach ist unter den untersuchten Parameterkombinationen die Bedingung $\theta = 10^\circ$ und $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ diejenige mit der höchsten Stäbchenaktivität. Nur hier ist deshalb ein Einfluss des Adaptationsspektrums auf die Wahrnehmungsschwelle nachzuweisen.

Abbildung 10.9 zeigt für die Adaptationsspektren HAL und ISO jeweils das Verhältnis der relativen spektralen Empfindlichkeiten von $\theta = 10^\circ/2,65^\circ$ bei der Adaptationsleuchtdichte $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$. Die dargestellten Verhältnisse zeigen, welche relativen Unterschiede sich bei den spektralen Empfindlichkeiten bei Änderung des Beobachtungswinkels von $\theta = 2,65^\circ$ auf $\theta = 10^\circ$ ergeben. Es ist deutlich zu erkennen, dass für beide Adaptationsspektren die Aktivität im kurzwelligen Spektralbereich zwischen $\lambda = 440 \text{ nm} < \lambda < 510 \text{ nm}$ deutlich zunimmt. Dies bestätigt den beschriebenen Purkinje-Effekt durch Änderung des Beobachtungswinkels (vgl. Abschnitt 2.1.3, S.10).

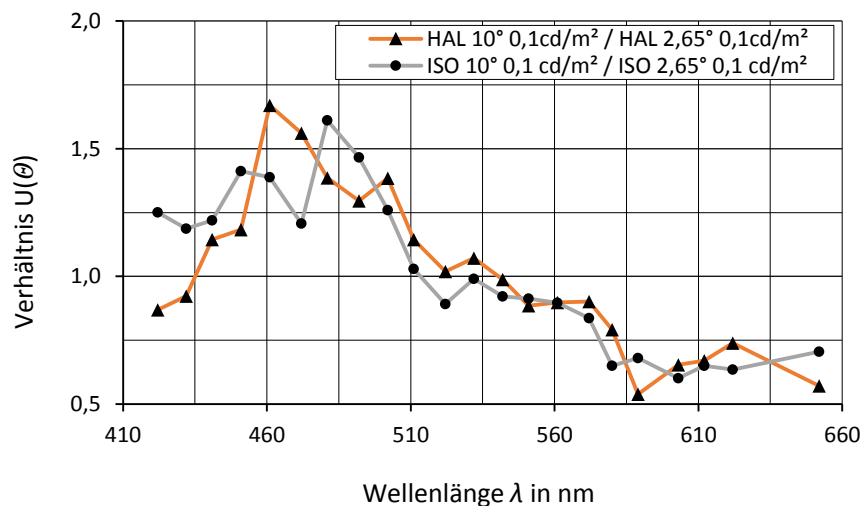


Abbildung 10.9: Verhältnis $U(\theta)$ der relativen spektralen Empfindlichkeiten für $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ als Quotient der beiden Beobachtungswinkel $\theta = 10^\circ/2,65^\circ$ für die Adaptationsspektren HAL und ISO

10.6 Vergleich mit ausgewählten anderen Untersuchungen

In den Abschnitten 10.1 bis 10.5 wurde der Einfluss des Adaptationsspektrums $L_{eU}(\lambda)$, des Objektspektrums $L_{eO}(\lambda)$, der Adaptationsleuchtdichte L_U und des Beobachtungswinkel θ auf die spektrale Empfindlichkeit an der Wahrnehmungsschwelle auf Basis der statistischen Analyse diskutiert.

Nachfolgend werden die Ergebnisse mit Untersuchungen aus der Literatur verglichen (vgl. u.a. Tabelle 3.1, S. 31). Dabei können aufgrund der vergleichbaren Wahl der Versuchsparameter und der Untersuchungsmethode prinzipiell nur die Studien von FREIDING et al. 2007 [55] und VARADY et al. 2007 [168] herangezogen werden. Leider liegen hier wie bei den meisten Publikationen die ermittelten spektralen Empfindlichkeiten nicht tabelliert vor. Eine Vergleichbarkeit ist deshalb auf die wenigen verfügbaren Daten beschränkt. So dienen als Vergleich auch Untersuchungen, die andere Methoden als die Wahrnehmungsschwelle mit Inkrement verwenden. Zudem werden nachfolgend nur Vergleiche anhand der normierten Empfindlichkeitsfunktionen durchgeführt. Eine Aussage über absolute Unterschiede ist auf Basis der verfügbaren Daten nicht möglich.

10.6.1 Vergleich mit HAMM 1997 [73]

Spektrale Empfindlichkeiten, die unter photopischen Bedingungen ermittelt wurden, können nicht auf den mesopischen Bereich übertragen werden (vgl. Kapitel 3, S. 29). Um dies zu verdeutlichen zeigt Abbildung 10.10 den Vergleich der ermittelten Empfindlichkeitsfunktionen HAL+D65+ISO für $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ und $\theta = 2,65^\circ$ aus Abbildung 10.2 auf S. 100 (Datenpunkte) mit den Werten aus HAMM 1997 [73] für $L_U = 100 \text{ cd/m}^2$ und $\theta = 0^\circ$ (durchgezogene Linie). Diese Daten wurden im photopischen Bereich anhand der Absolutschwelle (Durchprojektion) ermittelt (vgl. Abschnitt 2.1.3, S. 10).

Auch wenn der Beobachtungswinkel nicht identisch ist, wird insbesondere im kurzwelligen Bereich um $\lambda = 440 \text{ nm}$ ein stärkerer Beitrag der Zapfen deutlich. Ähnlich verhält es sich um $\lambda = 610 \text{ nm}$. Diese starken Beiträge des chromatischen Systems sind eindeutig durch die photopische Adaptation bedingt. Im Vergleich dazu fallen die beiden beschriebenen Anteile mit abnehmender Umfeldleuchtdichte für $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ und $\theta = 0^\circ$ bei HAMM (gestrichelte Linie) deutlich geringer aus. Die Ergebnisse zeigen, welchen großen Einfluss die Adaptationsleuchtdichte auf die spektrale Empfindlichkeit hat. Eine einfache Anwendung der so ermittelten Daten im mesopischen Bereich ist deshalb nicht zulässig.

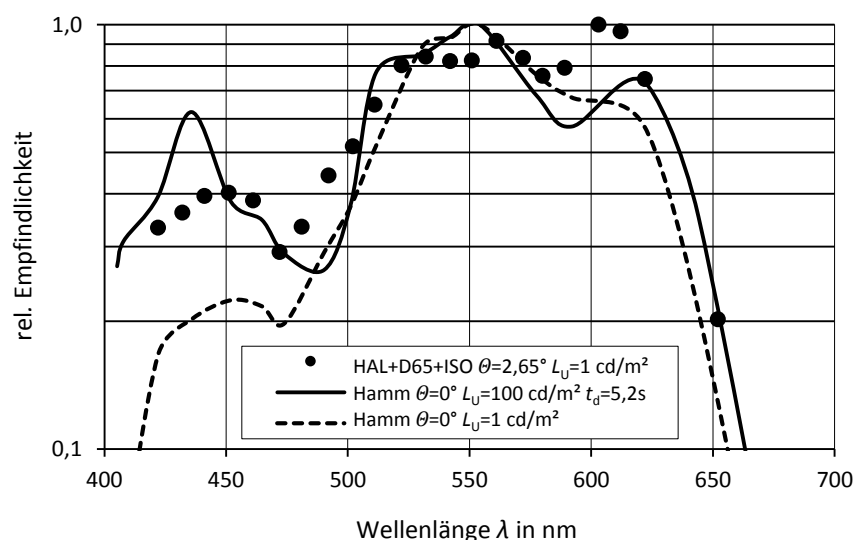


Abbildung 10.10: Relative spektrale Empfindlichkeiten für $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ und $\theta = 2,65^\circ$
Vergleich der ermittelten Daten für HAL+ISO+LED aus Abbildung 10.2 auf S. 100 mit den Werten aus HAMM 1997 [73] für $L_U = 100 \text{ cd/m}^2$, $\theta = 0^\circ$, CCT = 4560 K und $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$, $\theta = 0^\circ$, CCT = 3800 K

10.6.2 Vergleich mit VARADY et al. 2007 [168]

Eine Untersuchung, die anhand der achromatischen Wahrnehmungsschwelle als Inkrement (Aufprojektion) durchgeführt wurde, ist VARADY et al. 2007 [168]. Abbildung 10.11 zeigt die eigenen Ergebnisse für die Adaptationsspektren HAL, ISO und LED aus Abbildung 10.2 (S. 100) im Vergleich mit den Daten aus VARADY et al. 2007 [168] für die Bedingung $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ und $\theta = 10^\circ$. Da wie bei vielen anderen Publikationen keine Absolutwerte der spektralen Empfindlichkeiten publiziert wurden,

wird der einzige verfügbare Datensatz in seiner relativen auf das Maximum normierten Form zum Vergleich herangezogen (durchgezogene Linie). Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Empfindlichkeitsfunktionen, insbesondere für das ISO-Spektrum (runde Datenpunkte). Dabei ist zu berücksichtigen, dass VARADY et al. als Kriterium an der Schwelle die Diskrimination statt der Detektion verwenden.

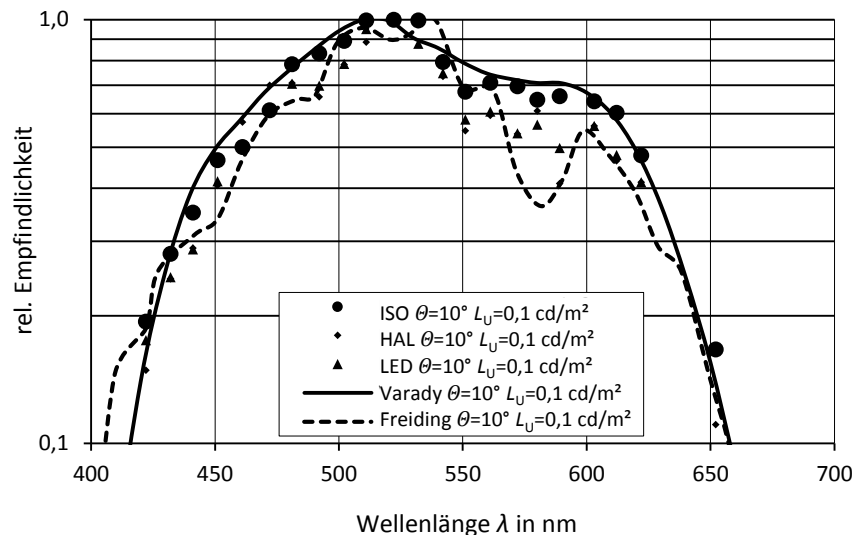


Abbildung 10.11: Relative spektrale Empfindlichkeiten für $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ und $\theta = 10^\circ$
Vergleich der ermittelten Daten für HAL+ISO+LED aus Abbildung 10.2 auf
S. 100 mit den Werten aus VARADY et al. 2007 [168] und FREIDING 2010 [54]

Durch die Adaptation auf $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ und durch den Beobachtungswinkel $\theta = 10^\circ$ ist das Maximum der Empfindlichkeit bei $\lambda = 510 \text{ nm}$ durch den starken Beitrag der Stäbchen zu erklären (vgl. Abbildung 2.8, S. 16). Das lokale Maximum um $\lambda = 600 \text{ nm}$ ist auf den Beitrag des chromatischen Opponentensystems (L-M) zurückzuführen (vgl. Abbildung 2.5, S. 10). Das unterstreicht, dass die beiden Farbrezeptoren im mittel- und langwelligen Bereich selbst bei $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ und $\theta = 10^\circ$ noch aktiv sind.

Nach den Ergebnissen von HAMM 1997 [73] ist mit zunehmender Darbietungszeit t_d ein steigender Anteil des chromatischen Systems zu verzeichnen. Trotz der Dauer $t_d = 3 \text{ s}$ im Vergleich zu den 350 ms der vorliegenden Arbeit sind jedoch keine auffälligen Unterschiede zu den Daten von VARADY et al. 2007 [168] erkennbar. Ein Anteil der kurzwelligen SWS-Zapfen ist in den Daten nicht feststellbar und nach KRASTEL et al. 1991 [103] durch die geringe Adaptationsleuchtdichte L_U auch nicht zu erwarten.

10.6.3 Vergleich mit FREIDING 2010 [54]

Als zweiter Vergleichsdatensatz wird in Abbildung 10.11 die Untersuchung aus FREIDING 2010 [54] (gestrichelte Linie) herangezogen. Sie wurde mit der Methode der absoluten Wahrnehmungsschwelle in Durchprojektion analog zu HAMM 1997 [73] aus Abschnitt 10.6.1 ermittelt. Im Vergleich mit den eigenen Daten und denen von VARADY et al. 2007 [168] fällt besonders auf, dass das lokale Maximum bei $\lambda = 600 \text{ nm}$ deutlich ausgeprägter ist. Da die Untersuchungsbedingungen weitgehend

identisch sind, ist als mögliche Ursache die unterschiedliche Methode (Absolutschwelle) denkbar. Eine präzise Analyse ist aufgrund der Datenbasis jedoch nicht möglich.

10.6.4 Vergleich mit KURTENBACH et al. 1999 [105]

Die Daten aus der Untersuchung von KURTENBACH et al. 1999 [105] wurden u.a. für $\theta = 5^\circ$ und $L_U = 14,98 \text{ td}$ ermittelt. Eine Umrechnung der Netzhautbeleuchtungsstärken von Troland in cd/m^2 kann bei Vorliegen des Pupillendurchmessers des Maxwellian-View-Systems erfolgen. Leider fehlt die Angabe in der Publikation. Verwendet man einen typischen durchschnittlichen Wert für Untersuchungen mit diesem System, so entspricht das einem Pupillendurchmesser von 2,5 mm (vgl. STILES & CRAWFORD 1933 [162], MOORHEAD & SAUNDERS 1982 [125]). Damit ergibt sich eine Adaptationsleuchtdichte von etwa $L_U = 3,1 \text{ cd/m}^2$.

Vergleicht man diese Werte mit den Ergebnissen aus der vorliegenden Arbeit, so kommt dies den Daten mit $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ und $\theta = 2,65^\circ$ am nächsten. Abbildung 10.12 zeigt beide Datensätze im Vergleich.

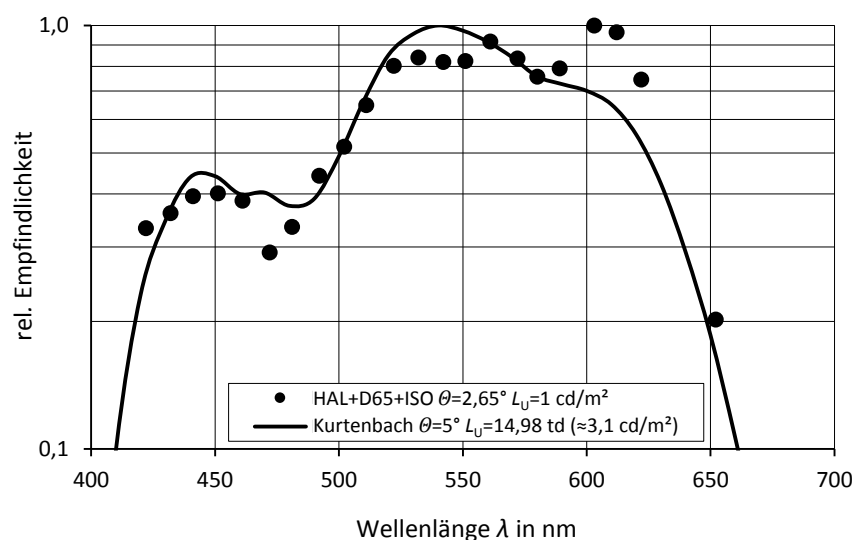


Abbildung 10.12: Relative spektrale Empfindlichkeiten für $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ und $\theta = 2,65^\circ$
Vergleich der ermittelten Daten für HAL+ISO+LED aus Abbildung 10.2 auf S. 100 mit den Werten aus KURTENBACH et al. 1999 [105]

Auffällig ist, dass die Daten aus KURTENBACH et al. bis auf den Bereich um $\lambda = 600\text{-}610 \text{ nm}$ relativ gut mit den eigenen Werten (Datenpunkte) übereinstimmen. Bei einer Änderung des Beobachtungswinkels von $\theta = 5^\circ$ auf $2,65^\circ$ erhöht sich der Anteil der Zapfen und deren Einfluss deutlich. Durch die unterschiedlichen Anteile der Zapfen (vgl. SPERLING 1980 [154]) betrifft dies jedoch insbesondere die Rezeptoren im mittel- und langwelligen Bereich. Diese tragen zu dem Kanal (L-M) um $\lambda = 600\text{-}610 \text{ nm}$ bei und sind ein möglicher Grund für die höhere Empfindlichkeit der Daten der vorliegenden Arbeit im Vergleich zu den Daten von KURTENBACH et al.

Fazit zu Abschnitt 10.6:

Die Vielfalt an Untersuchungsbedingungen und -methoden sowie fehlende tabellierte Angaben zu den ermittelten spektralen Empfindlichkeiten machen einen Vergleich der eigenen Untersuchungen mit Daten aus der Literatur schwierig oder eingeschränkt gültig. Die Anwendung von Empfindlichkeitsfunktionen, die im photopischen Bereich ermittelt wurden, ist im mesopischen Bereich nicht möglich. Die Unterschiede in der Darstellungszeit t_d und deren Einfluss auf die resultierende Empfindlichkeitsfunktionen sind zu gravierend (vgl. Abschnitt 10.6.1). Dennoch kann festgehalten werden, dass eine grundsätzliche Übereinstimmung zwischen den eigenen Daten und den ausgewählten Untersuchungen besteht, wenn die Versuchsbedingungen ähnlich sind (vgl. Abschnitt 10.6.2). Ebenso können die grundsätzlichen Anteile des chromatischen und achromatischen Systems in Abhängigkeit von den Umfeldparametern L_U und θ nachgewiesen und erklärt werden.

10.7 Vergleich mit dem Modell nach CIE 191:2010 [33]

Im Jahr 2010 hat die CIE zwei Modelle – USP und MOVE – zur Anwendung im mesopischen Bereich vorgeschlagen (vgl. CIE 191:2010 [33]). Nach dem Vergleich der Daten der vorliegenden Arbeit mit ausgewählten anderen Untersuchungen in Abschnitt 10.6 wird nachfolgend die Anwendbarkeit des aus dem MOVE-Projekt (ELOHOLMA & HALONEN 2005 [49]) hervorgegangenen Modellvorschlages aus der Publikation CIE 191:2010 [33] in Grundzügen überprüft. Das grundlegende Ziel beider Modellvorschläge besteht darin, eine mesopische Leuchtdichte L_{mes} als Größe zu berechnen, die der Wahrnehmung im mesopischen Bereich besser entspricht, als nur $V(\lambda)$ oder $V'(\lambda)$ als Bewertungsfunktion heranzuziehen. Die mesopische Leuchtdichte wird deshalb als gewichtete Linearkombination aus $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$ gebildet (vgl. CIE 191:2010 [33]).

Die Basis für die Berechnung von L_{mes} bildet die Berechnung der S/P-Verhältnisse aus den Spektraldaten der verwendeten Lichtquellen. Dazu wird das Lichtquellenspektrum einmal mit der $V'(\lambda)$ -Funktion gewichtet, um den S-Wert (skotopisch) zu erhalten. Durch gleiche Vorgehensweise mit der $V(\lambda)$ -Funktion wird der P-Wert (photopisch) berechnet. Nach Gleichung 10.1 ergibt sich das S/P-Verhältnis. Die berechneten S/P-Verhältnisse für die drei verwendeten Spektren HAL, ISO und LED für den Beobachtungswinkel $\theta = 10^\circ$ und $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ und $0,1 \text{ cd/m}^2$ zeigt Tabelle 10.3. Der Beobachtungswinkel $\theta = 10^\circ$ wird verwendet, da die zugrundeliegenden Untersuchungen für das MOVE-Modell auch unter dem Winkel von 10° durchgeführt wurden.

$$\frac{S}{P} = \frac{K'_m \int_0^\infty S_\lambda(\lambda) \cdot V'(\lambda) \cdot d\lambda}{K_m \int_0^\infty S_\lambda(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad \text{S/P-Verhältnis} \quad 10.1$$

mit:

$K'_m \approx 1699 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$; photometrisches Strahlungsäquivalent (skotopisch)

$K_m \approx 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$; photometrisches Strahlungsäquivalent (photopisch)

$S(\lambda)$ Spektrale Strahldichteverteilung der Lichtquelle (Adaptationsspektrum)

λ Wellenlänge

Tabelle 10.3: S/P-Verhältnisse für die Spektren HAL, ISO und LED
bei $\Theta = 10^\circ$ und $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ und $0,1 \text{ cd/m}^2$

	S/P	
	$L_U = 1 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$
HAL	1,33	1,33
ISO	2,21	2,21
LED	1,69	1,67

Nach Tabelle 4b aus CIE 191:2010 [33] ergibt sich die mesopische Leuchtdichte L_{mes} als Kennwert für den mesopischen Bereich zu den Werten in Tabelle 10.4. Dafür wurden die Daten in Tabelle 4b an den Stellen der S/P-Werte aus Tabelle 10.3 interpoliert.

Tabelle 10.4: Mesopische Leuchtdichte L_{mes} nach CIE 191:2010 [33]
gemäß Tabelle 4b (interpolierte Werte)

	L_{mes}	
	$L_U = 1 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$
HAL	1,0500	0,1132
ISO	1,1748	0,1428
LED	1,1026	0,1248

Unter Verwendung der mesopischen Leuchtdichten L_{mes} für das HAL-Spektrum als Referenz (100 %) ergeben sich die gebildeten Quotienten in Tabelle 10.5. Die Daten sind an einem Beispiel wie folgt zu interpretieren. Die drei Spektren HAL, ISO und LED werden unter mesopischen Adaptationsbedingungen zur Beleuchtung von drei Flächen verwendet. Alle drei Beleuchtungen werden auf die gleiche photopische Leuchtdichte $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ bzw. $0,1 \text{ cd/m}^2$ eingestellt. Die Basis für diese Einstellung bildet dabei die photopische $V(\lambda)$ -Funktion, die im mesopischen Bereich jedoch nicht wahrnehmungsgerecht bewertet und demnach eigentlich nicht angewendet werden dürfte.

Tabelle 10.5: Quotienten der mesopischen Leuchtdichte L_{mes}
aus Tabelle 10.4; Referenz: HAL = 100 %

	Quotient $L_{\text{mes}, x} / L_{\text{mes}, \text{HAL}}$	
	$L_U = 1 \text{ cd/m}^2$	$L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$
HAL	1,00	1,00
ISO	1,12	1,26
LED	1,05	1,11

Die nach dem CIE-Modell berechneten mesopischen Leuchtdichten nehmen nun für sich in Anspruch, dass sie der Wahrnehmung im mesopischen Bereich besser entsprechen. Sind alle 3 Flächen photopisch auf $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ eingestellt, so ergibt sich nach Tabelle 10.5 für das LED-Spektrum jedoch eine im Vergleich zum HAL-Spektrum um 5 % höhere mesopische Leuchtdichte. Unter Verwendung des ISO-Spektrums wird sogar eine um 12 % höhere mesopische Leuchtdichte erzielt. Somit lässt sich

folgern: je höher der kurzwellige S-Anteil einer Lichtquelle, umso mehr mesopische Leuchtdichte erzeugt sie unter mesopischen Bedingungen.

Dies wird umso deutlicher, wenn die Adaptationsleuchtdichte weiter in den mesopischen Bereich auf $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ sinkt. Hier betragen die Unterschiede von LED und ISO zu HAL sogar 11 % bzw. 26 %. So sagt es zumindest das von der CIE veröffentlichte Modell auf Basis des MOVE-Projektes voraus. Anhand von Gleichung 2.5 auf S. 20 bedeutet eine höhere Umfeldleuchtdichte L_U bei konstanter Leuchtdichte des Objektes L_O eine höhere Unterschiedsempfindlichkeit UE. Somit können Objekte leichter wahrgenommen werden.

Um diese Modellvoraussagen zu überprüfen, werden die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Daten verwendet. Zu diesem Zweck werden die über 11 Personen gemittelten spektralen Empfindlichkeiten herangezogen, die unter $\theta = 10^\circ$ und $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ und $0,1 \text{ cd/m}^2$ für die drei Adaptationsspektren HAL, ISO und LED ermittelt wurden.

Nach Gleichung 10.2 werden zu diesem Zweck die spektrale Strahldichteverteilung $S_\lambda(\lambda)$ eines Adaptationsspektrums mit seiner jeweiligen ermittelten absoluten spektralen Empfindlichkeitsfunktion im untersuchten Bereich zwischen $\lambda = 420 - 620 \text{ nm}$ integriert. Dies wird für jede Adaptationsleuchtdichte L_U und jeden Beobachtungswinkel θ durchgeführt. Als Ergebnis erhält man die mit der spektralen Empfindlichkeit gewichtete Strahldichteverteilung. Dieser Wert wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit als mesopische Schwellenleuchtdichte $L_{\text{mes},S}$ bezeichnet

$$L_{\text{mes},S} = \int_{420\text{nm}}^{620\text{nm}} S_\lambda(\lambda) \cdot V_{\text{mes},S}(\lambda) \cdot d\lambda \quad \text{Gewichtete Strahldichte} \quad 10.2$$

mit:

$V_{\text{mes},S}(\lambda)$ absolute spektrale Empfindlichkeitsfunktion
 $S(\lambda)$ Spektrale Strahldichteverteilung der Lichtquelle (Adaptationsspektrum)
 λ Wellenlänge

Tabelle 10.6 zeigt die berechneten Werte von $L_{\text{mes},S}$ zusammenfassend mit den Werten von L_{mes} der CIE aus Tabelle 10.5. Alle Werte sind bereits auf die Werte von HAL als Referenz normiert.

Tabelle 10.6: Mesopische Schwellenleuchtdichte $L_{\text{mes},S}$ im Vergleich mit den CIE-Werten aus Tabelle 10.5 für HAL, ISO und LED bei $\theta = 10^\circ$; Referenz: HAL = 100 %

	Quotient			
	$L_U = 1 \text{ cd/m}^2$		$L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$	
	Schiller	CIE	Schiller	CIE
HAL	1,00	1,00	1,00	1,00
ISO	1,14	1,12	1,16	1,26
LED	1,19	1,05	1,07	1,11

Ein Vergleich der Werte aus dem CIE-Modell mit den in Rahmen der vorliegenden Arbeit ermittelten Daten zeigt folgende Tendenzen:

- Für $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ stimmen die Modellwerte der CIE bei ISO gut mit den Werten der vorliegenden Arbeit überein. Allerdings sagt das CIE-Modell eine geringere mesopische Leuchtdichte für das LED-Spektrum voraus.
- Für $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ stimmen die grundsätzlichen Bewertungstendenzen zwischen CIE-Modell und eigenen Daten überein. Allerdings liegt das CIE-Modell mit seiner Vorhersage für ISO 8,6 % und für LED 3,7 % über den Werten der vorliegenden Arbeit.

Fazit:

Ein Vergleich der im Rahmen der vorliegenden Arbeit gewonnenen Daten mit dem CIE-Modell nach MOVE (CIE 191:2010 [33]) zeigt sowohl Übereinstimmungen, als auch Widersprüche. Die größten Unterschiede zeigen sich beim LED-Spektrum für $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$, wohingegen beim ISO-Spektrum eine gute Übereinstimmung vorzufinden ist. Für $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ stimmen die Tendenzen in der Voraussage des CIE-Modells. Allerdings sind die Prognosewerte höher als die ermittelten Daten in dieser Arbeit.

Dabei ist hervorzuheben, dass das ISO-Spektrum für $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ und das LED-Spektrum für $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ die höchsten Werte an mesopischer Leuchtdichte liefern. Unter Berücksichtigung, dass das ISO-Spektrum nicht praxisnah ist, kann festgehalten werden: das LED-Spektrum erzeugt im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen im Vergleich zum Spektrum ähnlich einer Glühlampe (HAL) als Adaptationsspektrum eine um 7 % ($L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$) bzw. 19 % ($L_U = 1 \text{ cd/m}^2$) höhere mesopische Leuchtdichte.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit lassen sich abschließend wie folgt zusammenfassen:

1. Die Sehaufgabe der *Detektion*, die der Wahrnehmung an der *achromatischen Schwelle* auf Basis von *Kontrastunterschieden* entspricht, besitzt für den Straßenverkehr eine dominierende Rolle. Die *achromatische Schwelle* beschreibt die *erste Wahrnehmung des visuellen Systems*, auf die eine aktive Reaktion erfolgen kann und besitzt damit einen direkten Bezug zur Sicherheit im Verkehrsgeschehen.
2. Im Bereich der automobilen Frontbeleuchtung zeigen sich *zwei Entwicklungstendenzen*: einerseits sind Lichtquellen - Halogenglühlampen, Xenonentladungslampen und LED - mit völlig verschiedenen spektralen Strahldichteverteilungen verfügbar. Andererseits bieten moderne assistenzbasierte Frontbeleuchtungssysteme die Möglichkeit den Sehkomfort und die Detektion durch eine räumlich immer feiner aufgelöste Lichtverteilung zu optimieren.
3. Diese Entwicklungstendenzen führen in ihrer Kombination zu der *Vision, die spektrale Verteilung der Lichtverteilung auch ortsaufgelöst anzupassen*, um so den Sehkomfort und die Detektion weiter zu optimieren. Dazu muss geprüft werden, inwieweit die spektrale Zusammensetzung des Adaptationsumfeldes die Detektion beeinflusst.
4. In der Literatur existieren zahlreiche Untersuchungen anhand der Schwellenmethode im photopischen Bereich. Allerdings sind diese nicht für den Anwendungsbereich der Kfz-Lichttechnik (mesopisches Sehen) übertragbar. Die Studien, die im mesopischen Bereich durchgeführt wurden, erweisen sich durch unterschiedliche Testmethoden, unterschiedliche Versuchsparameter und lückenhafte Dokumentation als nicht vergleichbar. Keine der gefundenen Studien hat bislang den Einfluss des Adaptationsspektrums auf die Wahrnehmungsschwelle im mesopischen Bereich sowie gleichzeitig die interindividuellen Unterschiede der getesteten Personen untersucht.
5. Aus diesem Grund ist in der vorliegenden Arbeit ein Versuchsaufbau geplant und umgesetzt worden, der erstmals die Möglichkeit bietet, den Einfluss des Adaptationsspektrums auf die Wahrnehmungsschwelle zu untersuchen. Dafür wurde eine spezielle Multi-LED-Lichtquelle entworfen, die verschiedene spektrale Strahldichteverteilungen auf kleinem Bauraum erzeugt. Der Aufbau ist vollständig radiometrisch kalibrierbar, so dass Aussagen über die absolute Wahrnehmungsschwelle und deren Veränderung getroffen werden können. Auf diese Weise sind sicherheitskritische Empfehlungen auch auf Basis des „unempfindlichsten“ Beobachters oder Grenzwerte mit einem 95 %-Konfidenzintervall möglich.
6. Der Versuchsaufbau ermöglicht eine flexible Variation aller relevanten Einflussparameter – wie der Umfeldleuchtdichte, des Umfeldspektrums, des Objektspektrums, des Beobachtungswinkels, des Sehwinkels – unter kontrollierten Bedingungen. Damit können alle relevanten Parameterkombinationen des realen Straßenverkehrs nachgebildet werden. Zudem bietet dieser Aufbau das Potential, den Informationsgehalt der Ergebnisse durch die Untersuchung

eines einheitlichen Probandenkollektivs zu erhöhen. Fragestellungen, die durch die Heterogenität der Untersuchungen in der Literatur nicht möglich waren, können so untersucht werden. Ein Anschluss an die Literatur (CIE-Normalbeobachter) konnte nachgewiesen werden.

7. Für im Straßenverkehr typische Bedingungen wurde eine Probandenstudie anhand des Versuchsaufbaus durchgeführt. Für die Adaptationsleuchtdichten $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ und $0,1 \text{ cd/m}^2$ wurden jeweils 10 Personen (Beobachtungswinkel $\theta = 2,65^\circ$) bzw. 11 Personen ($\theta = 10^\circ$) untersucht. 7 Personen nahmen als feste Gruppe an allen untersuchten Parameterkombinationen teil.
8. Anhand der ermittelten Rohdaten wurde eine umfangreiche statistische Signifikanzanalyse durchgeführt. Die Daten zeigen folgende Tendenzen.
 - Die interindividuellen Unterschiede zwischen den Testpersonen bezüglich der spektralen Empfindlichkeit an der Wahrnehmungsschwelle sind groß und erreichen den Faktor 7-8 als Quotient aus empfindlichster und unempfindlichster Person. Die Idee eines „Normalbeobachters“ kann durch diese Untersuchung nicht gestützt werden.
 - Für $\theta = 2,65^\circ$ kann für keine der beiden Adaptationsleuchtdichten $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ und $0,1 \text{ cd/m}^2$ ein signifikanter Einfluss des Adaptationsspektrums auf die spektrale Empfindlichkeit an der Wahrnehmungsschwelle nachgewiesen werden.
 - Dies gilt ebenso für die Parameterkombination $\theta = 10^\circ$ und $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$
 - Für $\theta = 10^\circ$ und $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ ist ein signifikanter Einfluss des Adaptationsspektrums auf die spektrale Empfindlichkeit an der Wahrnehmungsschwelle feststellbar. Dies gilt insbesondere für den Spektralbereich $500 \text{ nm} < \lambda < 530 \text{ nm}$. Bei dieser Parameterkombination lässt dies darauf schließen, dass insbesondere die Stäbchen im niedrigeren Bereich der Adaptationsleuchtdichte für diesen Effekt verantwortlich sind. Die unterschiedliche spektrale Strahldichteverteilung der verwendeten Adaptationsspektren kann als Ursache nachgewiesen werden. Das zur Adaptation verwendete LED-Spektrum erzeugt im Vergleich zu HAL eine um 7 % ($L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$) bzw. 19 % ($L_U = 1 \text{ cd/m}^2$) höhere mesopische Leuchtdichte.
 - Für alle untersuchten Parameterkombinationen kann ein hochsignifikanter Einfluss des Objektspektrums – eingestellt durch die Interferenzfilter im Strahlengang des Projektors – nachgewiesen werden.
 - Die Variation des Beobachtungswinkels θ und der Umfeldleuchtdichte L_U zeigt eindeutig die unterschiedlich intensive Aktivität des chromatischen und achromatischen Kanals an den typischen Stellen im Spektralbereich um $\lambda = 440 \text{ nm}$ und 610 nm .
9. Der Vergleich der eigenen Daten mit ausgewählten Untersuchungen aus der Literatur zeigt folgende Ergebnisse:
 - Keine der gefundenen Studien stimmt in allen Parametern mit den Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit überein. Eine Vergleichbarkeit ist deshalb nur sehr eingeschränkt möglich.
 - Eine Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Studien im photopischen Bereich in die Anwendung im mesopischen Bereich ist nicht möglich. Die Unterschiede in den spektralen Empfindlichkeiten sind zu groß.
 - Der chromatische und achromatische Kanal können für die diskutierten Unterschiede verantwortlich gemacht werden.

10. Die Überprüfung des CIE-Modells (MOVE) anhand der eigenen Datensätze zeigt folgende Ergebnisse:

- Für $\theta = 10^\circ$ und $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ zeigt das CIE-Modell übereinstimmende Tendenzen in der Vorhersage der mesopischen Leuchtdichte. Allerdings ist das absolute Niveau höher, als das die Daten der vorliegenden Arbeit zeigen.
- Für $\theta = 10^\circ$ und $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$ stimmt das CIE-Modell mit den Daten der vorliegenden Arbeit für das ISO-Spektrum sehr gut überein. Allerdings liegt die Vorhersage für das LED-Spektrum deutlich unter den hier ermittelten Werten.

Ableitung einer Empfehlung für die Automobillichttechnik:

11. Anhand der vorliegenden Daten kann für die spektrale Zusammensetzung des Adaptationspektrums bei kleinen Beobachtungswinkeln ($\theta = 2,65^\circ$) kein signifikanter Einfluss auf die spektrale Empfindlichkeit an der achromatischen Schwelle – und damit auf die Detektion von Objekten – nachgewiesen werden. Dies ist erst bei größeren Beobachtungswinkeln ($\theta = 10^\circ$) und einer niedrigen Adaptationsleuchtdichte $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ durch die unter diesen Bedingungen stark aktiven Stäbchen der Fall. Bei einer spektralen Anpassung der räumlichen Lichtverteilung von Scheinwerfersystemen wirkt sich auf Basis der vorliegenden Ergebnisse für den peripheren Bereich mit niedriger Adaptation eine spektrale Strahldichteverteilung ähnlich der getesteten LED positiv auf die Detektion von Objekten bzw. die erzeugte mesopische Leuchtdichte aus (vgl. Tabelle 10.6, S. 116). Das noch besser geeignete ISO-Spektrum ist in der Praxis nicht mit einer einzigen Lichtquelle erzeugbar.

Kritische Betrachtung und Ausblick:

12. Die aufgezeigten Tendenzen eines Einflusses des Adaptationsspektrums mit zunehmendem Beobachtungswinkel und abnehmender Adaptationsleuchtdichte machen die Prüfung weiterer Parameterkombinationen wie beispielsweise den Beobachtungswinkel $\theta = 20^\circ$ wünschenswert.
13. Trotz sorgfältigster Auswahl der Komponenten des Versuchsaufbaus, der Parameterkombinationen und der Untersuchungsmethodik bleibt eine Schwachstelle der Untersuchungen die vorhandene Nicht-Additivität der quasimonochromatisch abgetasteten spektralen Empfindlichkeit. Aus diesem Grund ist nachfolgend eine Erweiterung der Untersuchungen mit polychromatischen Objekten sinnvoll.
14. Zudem stellt in Erweiterung der Untersuchungen die Verwendung inhomogener Adaptationsfelder eine bessere Abbildung realer Verkehrssituationen dar.
15. Der Versuchsaufbau ist bereits für weitere Ergänzungen vorgerüstet. So sind die Integration einer flexibel einstellbaren Blendlichtquelle sowie das Nutzen von spektralen Strahldichteverteilungen realer Kfz-Lichtquellen für die Adaptation anhand eines zweiten Digitalprojektors mit austauschbaren Lichtquellen vorgesehen.

12 Literatur

- [1] ACER: Projektor H7532BD – Datenblatt, 4 S.,
Quelle: <http://www.acer.de/ac/de/DE/content/model-datasheet/MR.JG411.001>, 2011, abgerufen am 30.10.2013.
- [2] AGUINIS, H.; GOTTFREDSON, R. K.; JOO, H.: Best-Practice Recommendations for Defining, Identifying, and Handling Outliers.
In: Organizational Research Methods, Vol. 16, 2, 2013, S. 270–301.
- [3] ALANOD: MIRO – Unschlagbar energieeffizient und ökologisch sinnvoll, Datenblatt, 8 S.,
Quelle: http://alanod.com/opencms/export/sites/alanod/galleries/pdf2012/alanod_MIRO_8s_D_E.pdf, ALANOD GMBH & CO. KG, HRSG., 2012, abgerufen am 27.08.2014.
- [4] ANDOVER CORPORATION: Optical Filters and Coatings – Katalog und Datenblatt, 88 S.,
Quelle: <http://www.andovercorp.com/static/pdf/catalog.pdf>, 2013/2014, abgerufen am 10.01.2013.
- [5] ANSTIS, S.: The Purkinje rod-cone shift as a function of luminance and retinal eccentricity.
In: Vision Research, Vol. 42, 22, 2002, S. 2485–2491.
- [6] AUDI: Lichttechnologie Laser-Fernlicht für den Audi R18 e-tron quattro,
Quelle: http://www.audi.de/de/brand/de/vorsprung_durch_technik/content/2014/04/laserlicht.html, AUDI, HRSG., ABGERUFEN AM 20.01.2015.
- [7] BACH, M.; WESEMAN, W.; KOLLING, G.; BÜHREN, J., ET AL.: Photopisches Kontrastsehen.
In: Der Ophthalmologe, Vol. 105, 1, 2008, S. 46–59.
- [8] BAUMGARTNER, T.; WUNDERLICH, F.; JAUNICH, A.: Lighting the way: Perspectives on the global lighting market – Second Edition, MCKINSEY & COMPANY INC., HRSG.,
QUELLE: http://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/Automotive_and_Assembly/Lighting_the_way_Perspectives_on_global_lighting_market_2012.ashx, 2012.
- [9] BEN-GAL, I.: Outlier Detection.
In: MAIMON, O., ROKACH, L., Hrsg., Data Mining and Knowledge Discovery Handbook, Springer Science+Business Media Inc, Boston, MA, S. 131–146, 2005, ISBN 978-0-387-24435-8.
- [10] BLACKWELL, H. R.: Studies of the form of visual threshold data.
In: Journal of the Optical Society of America A, Vol. 43, 1953, S. 456–463.
- [11] BMW: Das Design des BMW i8,
Quelle: <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i8/2013/design.html>, 2015, abgerufen am 20.02.2015.
- [12] BODROGI, P.; BÖLL, M.; SCHILLER, C.; KHANH, T. Q.: Brightness appearance of automotive front lighting light sources – a series of visual experiments.
In: KHANH, T. Q., Hrsg., Proceedings of the 8th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Utz Verlag GmbH, München, S. 65–71, 2009, ISBN 978-3-8316-0904-8.
- [13] BODROGI, P.; VÁRADY, G.; SZALMAS, A.; MÁTRAI, R., ET AL.: A mesopic contrast threshold experiment.

-
- In: SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J., Hrsg., Proceedings of the 5th International Symposium on Progress in Automobile Lighting, Utz Verlag GmbH, München, 2003, ISBN 3-8316-0257-3.
- [14] BORTZ, J.; LIENERT, G. A.: Kurzgefasste Statistik für die klinische Forschung – Leitfaden für die verteilungsfreie Analyse kleiner Stichproben, Heidelberg, Springer, 458 S., 2008, ISBN 978-3-540-75737-5.
- [15] BORTZ, J.; SCHUSTER, C.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, Berlin [u.a.], Springer, 655 S., 2010, ISBN 978-3-642-12769-4.
- [16] BOYCE, P. R.: Human factors in lighting, London, New York, Taylor & Francis, 2. Aufl., 584 S., 2003, ISBN 0-7484-0949-1.
- [17] BREDEMEYER, H.; BULLOCK, K.; GODER, G.: Orthoptik, Berlin, N.Y., De Gruyter, 377 S., 1978, ISBN 9783110041958.
- [18] BRÜCKNER, S.: Farbdifferenz-Skalierung zur Farbqualitätsbeurteilung von Halbleiter-Lichtquellen, Dissertation.
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Darmstadt, 2014.
- [19] BUCK, S. L.: Cone-rod interaction over time and space.
In: Vision Research, Vol. 25, 7, 1985, S. 907–916.
- [20] BURGE, M. J.; BURGER, W.: Digitale Bildverarbeitung – Eine Einführung mit Java und ImageJ, Berlin [u.a.], Springer, 2. Aufl., 514 S., 2006, ISBN 3540309411.
- [21] BURGMANN, S.; HILDACH, U.; LENZ, F.; SCHLOHBOHM, W.; STREH, M.: Der Berufskraftfahrer LKW, Omnibus – Prüfungsleitfaden und Nachschlagewerk, München, Vogel, 11. Aufl., 416 S., 2005, ISBN 3574232012.
- [22] BUTTLER, G.: Ein einfaches Verfahren zur Identifikation von Ausreißern bei multivariaten Daten, Diskussionspapier.
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Statistik und empirische Wirtschaftsforschung, 1996.
- [23] CAMPBELL, M. C.; SIMONET, P.: Video monitoring of the principal ray of a Maxwellian view for the measurement of optical aberrations, the Stiles-Crawford effect, retinal resolution, and for investigating color vision.
In: Applied optics, Vol. 29, 10, 1990, S. 1420–1426.
- [24] CARHART, R.; JERGER, J. F.: Preferred Method For Clinical Determination Of Pure-Tone Thresholds.
In: Journal of Speech and Hearing Disorders, Vol. 24, 4, 1959, S. 330.
- [25] CIE, HRSG.: Proceedings 1951, Vol. 1, Sec. 4, Vol. 3, Paris, Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), 1951.
- [26] CIE, CIE 41, Technical Report: Light as a true visual quantity: Principles and Measurement, Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), Paris, 1978.
- [27] CIE, CIE 18.2, Technical Report: The Basis of Physical Photometry, Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), Wien, 2nd Ed. 1983 (Reprint 1996).

-
- [28] CIE, CIE 81, Technical Report: Mesopic photometry - History, special problems and practical solutions, 1. Aufl., Commission International de l'Éclairage (CIE), Wien, 1989.
- [29] CIE, CIE 86, Technical Report: CIE 1988 2° Spectral Luminous Efficiency Function for Photopic Vision, Commission International de l'Éclairage (CIE), Wien, 1990.
- [30] CIE, CIE 95, Technical Report: Contrast and visibility, 1. Aufl., Commission International de l'Éclairage (CIE), Vienna, 1992.
- [31] CIE, CIE S005/E-1998, Standard: CIE Standard Illuminants for Colorimetry, Commission International de l'Éclairage (CIE), Wien, 1998.
- [32] CIE, CIE 75-1988, Technical Report: Spectral Luminous efficiency fundtions based upon brightness matching for monochromatic point sources at 2° and 10° fields, Commission International de l'Éclairage (CIE), Wien, Photocopy Edition 2008.
- [33] CIE, CIE 191:2010, Technical Report: Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance, Commission International de l'Éclairage (CIE), Wien, 2010.
- [34] CRAWFORD, B. H.: The Scotopic Visibility Function.
In: Proceedings of the Physical Society. Section B, Vol. 62, 5, 1949, S. 321–334.
- [35] CURCIO, C. A.; SLOAN, K. R.; PACKER, O.; HENDRICKSON, A. E.; KALINA, R. E.: Distribution of cones in human and monkey retina: individual variability and radial asymmetry.
In: Science, Vol. 236, 4801, 1987, S. 579–582.
- [36] DAMASKY, J.: Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer, Dissertation.
Technische Hochschule Darmstadt, Lichttechnik, Darmstadt, 1995.
- [37] DARTNALL, H. J. A.; BOWMAKER, J. K.; MOLLON, J. D.: Human Visual Pigments: Microspectrophotometric Results from the Eyes of Seven Persons.
In: Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, Vol. 220, 1983, S. 115–130.
- [38] DAT: DAT-Report – Markt- und Konsumforschung für die Automobilwirtschaft, eigene Datenzusammenstellung des Autors auf Basis der DAT Jahresberichte, DEUTSCHE AUTOMOBIL TREUHAND GMBH, HRSG., 2003-2015, abgerufen am 13.10.2014.
- [39] DAT: DAT-Report 2008 – kfz-betrieb, 60 S.,
Quelle: http://www.dat.de/uploads/media/DAT-Report_2008_Kfz-Betrieb_03.pdf, DEUTSCHE AUTOMOBIL TREUHAND GMBH, HRSG., 2008, abgerufen am 13.10.2014.
- [40] DAT: DAT-Report 2014, 68 S.,
Quelle: http://www.dat.de/uploads/DATReport_2014/pubData/source/804.pdf, DEUTSCHE AUTOMOBIL TREUHAND GMBH, HRSG., 2014, abgerufen am 01.10.2014.
- [41] DERRA, G.; MOENCH, H.; FISCHER, E.; GIESE, H., ET AL.: UHP lamp systems for projection applications.
In: Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 38, 17, 2005, S. 2995–3010.
- [42] DIN, DIN 5031-3, Norm: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik, Beuth Verlag, Berlin, 1982.

-
- [43] DIN, DIN 5031-2, Norm: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Strahlungsbewertung durch Empfänger, Beuth Verlag, Berlin, 1982.
- [44] DIN, DIN 1319-1, Norm: Grundlagen der Meßtechnik, Beuth Verlag, Berlin, 1995.
- [45] DIN, DIN EN ISO 9241-303:2011, Norm: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 303: Anforderungen an elektronische optische Anzeigen, Beuth Verlag, Berlin, 2012.
- [46] DVR: Gefahren für Autofahrer bei Dunkelheit in Deutschland,
Quelle: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/160048/umfrage/gefahren-fuer-autofahrer-bei-dunkelheit/>, DEUTSCHER VERKEHRSSICHERHEITSRAT E.V., HRSG., 2008.
- [47] EDMUND OPTICS: Linearer Polarisationsfilm für sichtbares Licht,
Quelle: <http://www.edmundoptics.de/optics/polarizers/linear-polarizers/visible-linear-polarizing-film/2102>, EDMUND OPTICS, HRSG., 2014, abgerufen am 17.10.2014.
- [48] EISNER, A.; MACLEOD, D. I. A.: Blue-sensitive cones do not contribute to luminance.
In: Journal of the Optical Society of America, Vol. 70, 1, 1980, S. 121–123.
- [49] ELOHOLMA, M., HALONEN, L., Hrsg.: Performance based model for mesopic photometry - MOVE Report – Mesopic Optimisation of Visual Efficiency, Espoo, Helsinki University of Technology, 24 S., 2005, ISBN 951-22-7566-X.
- [50] ENDERS, M.: Vergleich ausgewählter Methoden zur Ermittlung der spektralen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges, Dissertation.
Technische Hochschule Darmstadt, Lichttechnik, Darmstadt, 1995.
- [51] FAHRMEIR, L.: Statistik – Der Weg zur Datenanalyse, Berlin [u.a.], Springer, 613 S., 2004, ISBN 978-3-540-21232-4.
- [52] FECHNER, G. T.: Elemente der Psychophysik – Erster Theil, Leipzig, Breitkopf und Härtel, 360 S., 1860, ISBN 978-1167635540.
- [53] FLI: Color Filter Wheel User's Guide – Bedienungsanleitung mit Datenblatt, 14 S.,
Quelle: http://www.flicamera.com/pdf/CFW_RevE.pdf, 2011, abgerufen am 08.05.2013.
- [54] FREIDING, A.: Untersuchungen zur spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges im mesopischen Bereich, Dissertation, München, Utz, 171 S., 2010, ISBN 978-3-8316-0991-8.
- [55] FREIDING, A.; ELOHOLMA, M.; KETOMÄKI, J.; HALONEN, L., ET AL.: Mesopic visual efficiency I: detection threshold measurements.
In: Lighting Research and Technology, Vol. 39, 4, 2007, S. 319–334.
- [56] FRIEDBURG, C.; SHARPE, L. T.; BEUEL, S.; ZRENNER, E.: A computer-controlled system for measuring dark adaptation and other psychophysical functions.
In: Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology, Vol. 236, 1998, S. 31–40.
- [57] GALL, D.; THIELE, E.: Adaptationsleuchtdichte und mittlere Leuchtdichte bei direktem und indirektem Sehen.
In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Ilmenau,, Vol. 14, 3, 1968, S. 321–325.
- [58] GEGENFURTNER, K. R.; KIPER, D. C.: Color vision.
In: Annual review of neuroscience, Vol. 26, 2003, S. 181–206.

-
- [59] GERDES, H.-R.: Das Wahrnehmen von Lichtzeichen an der achromatischen und chromatischen Schwelle, Dissertation.
Technische Hochschule Darmstadt, Elektrische Energietechnik, Darmstadt, 1979.
- [60] GHASEMI, A.; ZAHEDIASL, S.: Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians.
In: International journal of endocrinology and metabolism, Vol. 10, 2, 2012, S. 486–489.
- [61] GIBSON, K. S.; TYNDALL, E. P. T.: Visibility of radiant energy.
In: BURGESS, G. K., Hrsg., Scientific Papers of the Bureau of Standards, Government Printing Office, Washington, S. 130–191, 1923–24.
- [62] GOLDSTEIN, E. B.; IRTEL, H.; PLATA, G.: Wahrnehmungspsychologie – Der Grundkurs, Berlin [u.a.], Spektrum, Akad. Verl., 7. Aufl., 527 S., 2008, ISBN 978-3827417664.
- [63] GOODMAN, T.; FORBES, A.; WALKEY, H.; ELOHOLMA, M., ET AL.: Mesopic visual efficiency IV: a model with relevance to nighttime driving and other applications.
In: Lighting Research and Technology, Vol. 39, 4, 2007, S. 365–392.
- [64] GOODMAN, T. M.: Workshop - Making measurements in the mesopic region.
In: CIE, Hrsg., Proceedings of the NPL-CIE-UK Conference Visual Scales; Photometric and Colorimetric Aspects, Commission International de l'Éclairage (CIE), Wien, 1997.
- [65] GRAMBERG-DANIELSEN, B.; HARTMANN, E.; GIEHRING, H.: Der Dunkelheitsunfall, Stuttgart, Enke, 170 S., 1984, ISBN 343294411X.
- [66] GREEN, M., ALLEN, M. J., ABRAMS, B. S., WEINTRAUB, L., Hrsg.: Forensic vision with application to highway safety, Tucson, AZ, Lawyers & Judges Pub. Co., 496 S., 2008, ISBN 978-1-933264-54-7.
- [67] GREENHOUSE, S. W.; GEISSER, S.: On methods in the analysis of profile data.
In: Psychometrika, Vol. 24, 2, 1959, S. 95–112.
- [68] GREULE, R.: Kontrastschwellen bei transienter Adaptation, Dissertation.
Universität Fridericana Karlsruhe, Elektrotechnik, Karlsruhe, 1993.
- [69] GROSVENOR, T. P.: Primary care optometry, St. Louis, Mo., Butterworth-Heinemann/Elsevier, 5. Aufl., 510 S., 2007, ISBN 9780750675758.
- [70] GUTMANN, F. T.: Entwurf, Aufbau und Validierung eines Versuchsstands zur Untersuchung des spektralen Blend- und Detektionsverhaltens unter Straßenverkehrsbedingungen, Diplomarbeit.
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Darmstadt, 2012.
- [71] HAFERKEMPER, N.; FROHNAPFEL, A.; PARAMEI, G.; KHANH, T.: A mesopic experiment series at automotive visual conditions.
In: KHANH, T. Q., Hrsg., Proceedings of the 7th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Utz Verlag GmbH, München, S. 402–409, 2007, ISBN 978-3-8316-0711-2.
- [72] HALONEN, L.; ELOHOLMA, M.: Development of Mesopic Photometry Based on New Findings On Visual Performance.

-
- In: CIE, Hrsg., Proceedings of the CIE Symposium - Vision and Lighting in Mesopic Conditions, 21 May 2005, Auditorio Municipal of León, Spain, Commission International de l'Éclairage (CIE), Vienna, S. 1–4, 2005, ISBN 3901906436.
- [73] HAMM, M.: Untersuchung der spektralen Schwellenempfindlichkeit und der Reizverarbeitung im menschlichen Auge, Dissertation.
Technische Hochschule Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Darmstadt, 1997.
- [74] HARTGE, J. E.: Untersuchungen zur spektralen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges bei kleinen Lichtquellen, Dissertation.
Technische Hochschule Darmstadt, Lichttechnik, Darmstadt, 1990.
- [75] HE, Y.; REA, M.; BIERMAN, A.; BULLOUGH, J.: Evaluating Light Source Efficacy under Mesopic Conditions Using Reaction Times.
In: Journal of the Illuminating Engineering Society, Vol. 26, 1, 1997, S. 125–138.
- [76] HE, Y.; REA, M. S.; BIERMAN, A.; BULLOUGH, J. D.: Evaluating Light Source Efficacy Under Mesopic Conditions Using Reaction Times, 1997, S. 236–257.
- [77] HELD, A.; STRAUß, S.: Grundlagen der Farbwiedergabe Teil 1, Seminar.
Universität Koblenz Landau, Informatik, Koblenz, 2007.
- [78] HENTSCHEL, H.-J., Hrsg.: Licht und Beleuchtung – Grundlagen und Anwendungen der Lichttechnik, Heidelberg, Hüthig, 386 S., 2002, ISBN 3-7785-2817-3.
- [79] HERING, E.: Zur Lehre vom Lichtsinne – Sechs Mitteilungen an die Kaiserl. Akademie der Wissenschaften in Wien, Wien, Carl Gerold's Sohn, 2. Aufl., 145 S., 1878.
- [80] HYDE, E. P.; FORSYTHE, W. E.; CADY, F. E.: The Visibility of Radiation.
In: The Astrophysical Journal, Vol. 48, 2, 1918, S. 65–88.
- [81] IBM: SPSS Statistics 22: implementierte Hilfsfunktion – Hilfe > Option "Advanced Statistics" > GLM - Messwiederholungen.
- [82] ICHIKAWA, H.; HUKAMI, K.; TANABE, S.: Standard pseudoisochromatic plates – Part 2 - For Acquired Color Vision Defects, Tokyo, New York, Igaku-Shoin, 1. Aufl., 1983, ISBN 0-89640-081-6.
- [83] ICHIKAWA, H.; HUKAMI, K.; TANABE, S.; KAWAKAMI, G.: Standard Pseudoisochromatic Plates.
In: Clinical and Experimental Optometry, Vol. 62, 8, 1979, S. 362.
- [84] IGUCHI, T., PATEL, S., LARES, M.: A Guide to Selecting Lamps,
Quelle: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=44487>, 2010, abgerufen am 01.09.2014.
- [85] ITIS HOLDINGS: Durchschnittsgeschwindigkeit in ausgewählten Städten Europas, 8 S.,
Quelle: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/37200/umfrage/durchschnittsgeschwindigkeit-in-den-15-groessten-staedten-der-welt-2009>, FORBES, HRSG., 2008, abgerufen am 30.09.2014.
- [86] JAINSKI, P.: Die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges und ihre Bedeutung für die Lichtmeßtechnik, Dissertation.
Technische Hochschule Berlin, Berlin, 1938.

-
- [87] JANSSEN, J.; LAATZ, W.: Statistische Datenanalyse mit SPSS – Eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul Exakte Tests von Jürgen Janssen, Wilfried Laatz, Berlin, Heidelberg, Imprint: Springer, 804 S., 2013.
- [88] JOOS, M.; RÖTTING, M.; VELICHKOVSKY, B. M.: Bewegungen des menschlichen Auges: Fakten, Methoden und innovative Anwendungen.
In: RICKHEIT, G. et al., Hrsg., Psycholinguistik (Psycholinguistics) - Ein Internationales Handbuch (An International Handbook), Walter De Gruyter Incorporated, New York, S. 142–168, 2003, ISBN 3110114240.
- [89] JUDD, D. B.: Report of U.S. Secretariat Committee on Colorimetry and Artificial Daylight.
In: CIE, Hrsg., Proceedings of the Twelfth Session of the CIE - Stockholm, Commission International de l'Éclairage (CIE), Paris, S. 11, 1951.
- [90] KAERNBACH, C.: Adaptive threshold estimation with unforced-choice tasks.
In: Perception & Psychophysics, Vol. 63, 8, 2001, S. 1377–1388.
- [91] KINGDOM, FREDERICK A. A.: Psychophysics.
In: RAMACHANDRAN, V. S., Hrsg., Encyclopedia of Human Behavior, Elsevier, S. 234–239, 2012, ISBN 9780080961804.
- [92] KINGDOM, FREDERICK A. A.; PRINS, N.: Psychophysics – A practical introduction, London, Academic, 1. Aufl., xv, 279, 2010, ISBN 978-0-12-373656-7.
- [93] KING-SMITH, P. E.; CARDEN, D.: Luminance and opponent-color contributions to visual detection and adaptation and to temporal and spatial integration.
In: Journal of the Optical Society of America, Vol. 66, 7, 1976, S. 709–717.
- [94] KING-SMITH, P. E.; GRIGSBY, S. S.; VINGRYS, A. J.; BENES, S. C.; SUPOWIT, A.: Efficient and unbiased modifications of the QUEST threshold method: Theory, simulations, experimental evaluation and practical implementation.
In: Vision Research, Vol. 34, 7, 1994, S. 885–912.
- [95] KLEIN, S. A.: Measuring, estimating, and understanding the psychometric function.
In: Perception & Psychophysics, Vol. 63, 8, 2001.
- [96] KLEIN, S. A., MACMILLAN, N. A., Hrsg.: Special Issue: Psychometric Functions and Adaptive Methods, Sammlung von Artikeln.
In: Perception & Psychophysics, 2001, 179 S.
- [97] KNIGHT, R.; BUCK, S. L.; FOWLER, G. A.; NGUYEN, A.: Rods affect S-cone discrimination on the Farnsworth–Munsell 100-hue test.
In: Vision Research, Vol. 38, 21, 1998, S. 3477–3481.
- [98] KODAK: Kodak Wratten 2 Neutrallichtfilter,
Quelle: <http://www.edmundoptics.de/optics/optical-filters/neutral-density-filters/kodak-wratten-2-neutral-density-filters/2928>, KODAK, HRSG., 2014, abgerufen am 17.10.2014.
- [99] KOKOSCHKA, S.: Über die Kontrastempfindlichkeit bei konstanter Adaptation aber variabler Objektleuchtdichte.
- [100] KOKOSCHKA, S.: Untersuchungen zur mesopischen Strahlungsbewertung, Dissertation. Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1972.
-

-
- [101] KONICA MINOLTA INC.: Spectroradiometer CS-2000/2000A – Datenblatt, 6 S.,
Quelle: http://www.konicaminolta.com/instruments/download/catalog/display/pdf/cs2000_catalog_eng.pdf, 2014, abgerufen am 12.08.2014.
- [102] KRANDA, K.; KING-SMITH, P. E.: Detection of coloured stimuli by independent linear systems.
In: Vision Research, Vol. 19, 7, 1979, S. 733–745.
- [103] KRASTEL, H.; JAEGER, W.; ZIMMERMAN, S.; HECKMANN, B.; KRYSTEK, M.: Systematics of human photopic spectral sensitivity.
In: DRUM, B. et al., Hrsg., Colour Vision Deficiencies X, Springer Netherlands, Dordrecht, S. 323–339, 1991, ISBN 978-94-010-5680-9.
- [104] KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A.: Use of ranks in one-criterion variance analysis.
In: Journal of the American Statistical Association, Vol. 47, 260, 1952, S. 583–621.
- [105] KURTENBACH, A.; MEIERKORD, S.; KREMERS, J.: Spectral sensitivities in dichromats and trichromats at mesopic retinal illuminances.
In: Journal of the Optical Society of America A, Vol. 16, 7, 1999, S. 1541–1548.
- [106] LACHENMAYR, B. J.; FRIEDBURG, D.; HARTMANN, E.: Auge, Brille, Refraktion – Schober-Kurs: verstehen, lernen, anwenden, Stuttgart [u.a.], Thieme, 4. Aufl., Online-Ressource, 2006, ISBN 9783131395542.
- [107] LAMBERT, J. H.: Lamberts Photometrie – Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae, Leipzig, Wilhelm Engelmann, 432 S., 1760.
- [108] LANGE, H., Hrsg.: Handbuch für Beleuchtung, Landsberg, Ecomed, 722 / Losebl.-Ausg, 1992, ISBN 3-609-75390-0.
- [109] LANTHONY, P.: The desaturated panel D-15.
In: Documenta Ophthalmologica, Vol. 46, 1, 1978, S. 185–189.
- [110] LEE FILTERS: Technical Filters – Neutral Density, Reduces light intensity without changing colour,
Quelle: <http://www.leefilters.com/lighting/technical-list.html>, LEE FILTERS, HRSG., 2014, abgerufen am 17.10.2014.
- [111] LEEK, M. R.: Adaptive procedures in psychophysical research.
In: Perception & Psychophysics, Vol. 63, 8, 2001, S. 1279–1292.
- [112] LEVITT, H.: Transformed up-down methods in psychoacoustics.
In: The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 49, 2, 1971, S. 467–477.
- [113] LINKSZ, A.: The Farnsworth Panel D-15 Test.
In: American Journal of Ophthalmology, Vol. 62, 1, 1966, S. 27–37.
- [114] LINSCHOTEN, M. R.; HARVEY, L. O.; ELLER, P. M.; JAFEK, B. W.: Fast and accurate measurement of taste and smell thresholds using a maximum-likelihood adaptive staircase procedure.
In: Perception & Psychophysics, Vol. 63, 8, 2001, S. 1330–1347.
- [115] LOREK, F.: Lichttechnik-Trends: Blau machen, 4 S.,
Quelle: <http://www.automobil-produktion.de/2014/07/lichttechnik-trends-blau-machen/>, AUTOMOBIL PRODUKTION, HRSG., 2014, abgerufen am 27.09.2014.

-
- [116] LUND, A., LUND, M.: How to perform a two-way repeated measures ANOVA in SPSS Statistics, Quelle: <https://statistics.laerd.com/spss-tutorials/two-way-repeated-measures-anova-using-spss-statistics.php>, LAERD STATISTICS, HRSG., 2013, abgerufen am 29.01.2015.
- [117] LUND, A., LUND, M.: Within-within-subjects ANOVA in SPSS, Quelle: <https://statistics.laerd.com/premium/wwsa/within-within-anova-in-spss.php>, LAERD STATISTICS, HRSG., 2013, abgerufen am 05.02.2015.
- [118] LÜPSEN, H.: Kursunterlagen: Skripte zur Statistik – Varianzanalysen, Skriptum. Universität zu Köln, Regionales Rechenzentrum, Köln.
- [119] MARÉES, H. D.; HECK, H.: Sportphysiologie, Köln, Sportverl. Strauß, 9. Aufl., 799 S., 2006, ISBN 9783939390008.
- [120] MAUCHLY, J. W.: Significance Test for Sphericity of a Normal n-Variate Distribution. In: The Annals of Mathematical Statistics, Vol. 11, 2, 1940, S. 204–209.
- [121] MICHLER, M.: Filter und dünne Schichten. In: NAUMANN, H. et al., Hrsg., Handbuch Bauelemente der Optik - Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik, Hanser, München, S. 197–225, 2014, ISBN 3446426256.
- [122] MIKASCH, H. D.; HAACK, J.: Blickbewegungsforschung - Einführung in die Physiologischen Grundlagen, Techniken und in die Problem- und Anwendungsbereiche. In: ISSING, L. J. et al., Hrsg., Blickbewegung und Bildverarbeitung - Kognitionspsychologische Aspekte visueller Informationsverarbeitung, P. Lang, Frankfurt am Main, New York, S. 11–36, 1986, ISBN 9783820486285.
- [123] MISCHLER, G.: Kontrastdefinitionen, Quelle: <http://www.schorsch.com/de/wissen/glossar/kontrast.html>, 2011, abgerufen am 22.01.2014.
- [124] MOLLON, J. D.: The Theory of Colour Vision. In: CONNOLLY, K. J., Hrsg., Psychology survey No.2, Allen and Unwin, London, S. 128–150, 1979, ISBN 9780041500691.
- [125] MOORHEAD, I. R.; SAUNDERS, J. E.: Discrimination and detection thresholds: The effect of observer criterion on the spatial properties of chromatic and achromatic mechanisms. In: Vision Research, Vol. 22, 8, 1982, S. 1057–1060.
- [126] MORRIS, H. R.; HOYT, C. C.; MILLER, P.; TREADO, P. J.: Liquid Crystal Tunable Filter Raman Chemical Imaging. In: Applied Spectroscopy, Vol. 50, 6, 1996, S. 805–811.
- [127] MÖSGEN, A.: Regionalentwicklung in Deutschland und ihre Determinanten, Berlin, LIT Verlag Dr. W. Hopf, 2008, ISBN 9783825810474.
- [128] ORREVETELÄINEN, P.: Models for spectral luminous efficiency in peripheral vision at mesopic and low photopic luminance levels, Dissertation. Helsinki University of Technology, Lighting Laboratory, Espoo, 2005.

-
- [129] OSRAM: Osram Compact steuern intelligente Scheinwerfer der neuen CLS-Generation, Quelle: http://www.osram.de/osram_de/presse/pressemedien/_fachpresse/2014/osram-hochleistungs-led-fuer-adaptive-frontlichtsysteme/index.jsp?src=rss_fachpresse_59594, 2014, abgerufen am 20.01.2015.
- [130] ÖZTUNA, D.; ELHAN, A. H.; TÜCCAR, E.: Investigation of Four Different Normality Tests in Terms of Type 1 Error Rate and Power under Different Distributions. In: Turkish Journal of Medical Sciences, Vol. 36, 3, 2006, S. 171–176.
- [131] PARKE, C. S.: Essential first steps to data analysis – Scenario-based examples using SPSS, Pittsburgh, PA, 265 S., 2013, ISBN 9781412997515.
- [132] PEKARSKI, P.; HECHTFISCHER, U.; HEUSLER, G.; KOERBER, A., ET AL.: UHP Lamps for Projection Systems. In: ICPIG, Hrsg., International Conference on Phenomena in Ionized Gases, July 15-20, Greifswald, 2003.
- [133] PERKINELMER: Liquid Crystal Tunable Filters (LCTF) – Datenblatt, 4 S., Quelle: http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-140156DTS_010053A_01_VariSpec_DTS.pdf, 2013, abgerufen am 20.08.2014.
- [134] PFISTER, R.: Methoden der Unterschiedsprüfung – Mitschrift der Vorlesung von Dr. Rainer Scheuchenpflug im SS 2008, Würzburg, 53 S., Quelle: http://www.roland-pfister.net/downloads/studium/HS_Meth_Unterschiedspruefung.pdf, 2008, abgerufen am 29.01.2015.
- [135] PLAINIS, S.; MURRAY, I. J.; CHAUHAN, K.; CHARMAN, W. N.: Reaction Times as an Index of visual conspicuity at night. In: GALE, A. G. et al., Hrsg., Vision in vehicles - VIII, Applied Vision Research Centre, Loughborough University, Leicestershire, UK, S. 205–212, 2012, ISBN 0957126603.
- [136] PURKINJE, J. E.: Beiträge zur Kenntniss des Sehens in subjectiver Hinsicht, Prag, Fr. Vetterl Edlen von Wildenbrunn, 192 S., 1819.
- [137] RAZALI, N. M.; WAH, Y. B.: Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. In: Journal of Statistical Modeling and Analytics, Vol. 2, 1, 2011, S. 21–33.
- [138] REA, M. S.; BULLOUGH, J. D.; FREYSSINIER-NOVA, J. P.; BIERMAN, A.: A proposed unified system of photometry – X-Modell. In: Lighting Research and Technology, Vol. 36, 2, 2004, S. 85–111.
- [139] READ, JENNY C. A.: Gamma correction, Quelle: <http://www.jennyreadresearch.com/research/lab-set-up/gamma-correction/>, 2014, abgerufen am 20.08.2014.
- [140] RÖNZ, B., STROHE, H. G., ECKSTEIN, P., Hrsg.: Lexikon Statistik, Gabler Wirtschaft, Wiesbaden, Gabler, 424 S., 1994, ISBN 3409199527.
- [141] S1 OPTICS: Begleitende Dokumentation zur Bestellung – Datenblatt, 4 S., S1 OPTICS GMBH, HRSG., 2014.

-
- [142] SACHS, L.; HEDDERICH, J.: Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R, Berlin [u.a.], Springer, 722 S., 2006, ISBN 978-3-540-32160-6.
- [143] SCHÄFER, S.: Rezeptororientierte Charakterisierung breitbandiger Spektren als Basis einer mesopischen Hellempfindung, Dissertation.
Technischen Universität Berlin, Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik, Berlin, 2012.
- [144] SCHENDERA, CHRISTIAN F. G: Datenqualität mit SPSS – Ausreißer – Erkennen, Interpretieren und Umgehen, München [u.a.], Oldenbourg, XVII, 472 S., 2007, ISBN 3486582143.
- [145] SCHILLER, C.: Messung der achromatischen Schwelle in Abhängigkeit der Pulsform im mesopischen Bereich des Sehens, Diplomarbeit.
Technische Universität Darmstadt, Lichttechnik, Darmstadt, 2004.
- [146] SCHILLER, C.; BÖLL, M.; BODROGI, P.; KHANH, T. Q.: Detection and Conspicuity of Road Markings – Impact of Spectral Power Distribution.
In: SIA, Hrsg., VISION Proceedings, Suresnes Cedex, 2010.
- [147] SCHILLER, C.; SPRUTE, J. H.; BÖLL, M.; KHANH, T. Q.; GROH, A.: HID vs. Tungsten Halogen Head-lamps: Driver Preferences and Visibility Distance – SAE Technical Paper 2009-01-0550.
In: SAE INTERNATIONAL, Hrsg., Proceedings of the SAE World Congress 2009, Warrendale, PA, 2009.
- [148] SCHMIDT, R. F., LANG, F., THEWS, G., Hrsg.: Physiologie des Menschen – mit Pathophysiologie, Springer-Lehrbuch, Berlin, Heidelberg [u.a.], Springer, 994 S., 2005, ISBN 3-540-21882-3.
- [149] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.: Der Dunkelheitsunfall – Präventive Lichttechnik.
In: DEUTSCHE AKADEMIE FÜR VERKEHRSWISSENSCHAFT, Hrsg., 28. Deutscher Verkehrsgerichtstag - Gehaltene Referate und erarbeitete Empfehlungen. Tagungsband, S. 150–161, 1990.
- [150] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.; FREIDING, A.: Sehvermögen von Kraftfahrern und Lichtbedingungen im nächtlichen Straßenverkehr, Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW, Verlag für Neue Wissenschaft GmbH, 44 S, 2004, ISBN 3-86509-102-4.
- [151] SCHNEIDER, D.: Markierungslicht - eine Scheinwerferlichtverteilung zur Aufmerksamkeitssteuerung und Wahrnehmungssteigerung von Fahrzeugführern Dominik Schneider, Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2011, München, Utz, 159 S. : Ill., graph. Darst, 2011, ISBN 978-3-8316-4116-1.
- [152] SHARP, G. D.; JOHNSON, K. M.; MASTERSON, H. J.; DOROSKI, D.: Smectic liquid crystal tunable filters.
In: Ferroelectrics, Vol. 114, 1, 1991, S. 55–69.
- [153] SILBERNAGL, S.; DESPOPOULOS, A.; GAY, R.; ROTHENBURGER, A.: Taschenatlas der Physiologie, Stuttgart, New York, Georg Thieme, 5. Aufl., 436 S., 2001, ISBN 3-13-567705-2.
- [154] SPERLING, H. G.: Blue Receptor Distribution in Primates from Intense Light in Histochemical Studies.
In: VERRIEST, G., Hrsg., Color Vision Deficiencies V, Adam Hilger, Bristol, S. 30–44, 1980.
- [155] SPRUTE, J. H.: Entwicklung lichttechnischer Kriterien zur Blendungsminimierung von adaptiven Fernlichtsystemen, Dissertation.
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Darmstadt, 2012.
-

-
- [156] STABELL, B.; STABELL, U.: Chromatic rod–cone interaction during dark adaptation.
In: *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 15, 11, 1998, S. 2809.
- [157] STABELL, B.; STABELL, U.: Effects of rod activity on color perception with light adaptation.
In: *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 19, 7, 2002, S. 1249.
- [158] STABELL, U.; STABELL, B.: Mechanisms of chromatic rod vision in scotopic illumination.
In: *Vision Research*, Vol. 34, 8, 1994, S. 1019–1027.
- [159] STILES, W. S.: The Directional Sensitivity of the Retina and the Spectral Sensitivities of the Rods and Cones.
In: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. 127, 846, 1939, S. 64–105.
- [160] STILES, W. S.: The Basic Sensation Curves of the Three-Color Theory.
In: *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 36, 8, 1946, S. 491.
- [161] STILES, W. S.: Increment thresholds & the mechanisms of colour vision.
In: *Documenta Ophthalmologica*, Vol. 3, 1, 1949, S. 138–163.
- [162] STILES, W. S.; CRAWFORD, B. H.: The Liminal Brightness Increment as a Function of Wave-Length for Different Conditions of the Foveal and Parafoveal Retina.
In: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. 113, 785, 1933, S. 496–530.
- [163] STOCKMAN, A.; SHARPE, L. T.: The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype.
In: *Vision Research*, Vol. 40, 13, 2000, S. 1711–1737.
- [164] STRASBURGER, H.: Converting between measures of slope of the psychometric function.
In: *Perception & Psychophysics*, Vol. 63, 8, 2001, S. 1348–1355.
- [165] SZALMAS, A.; VÁRADY, G.; LENYEL, N.; BODROGI, P.; SCHANDA, J.: Comparison of Spectral Contrast Threshold and Reaction Time Experiments in the Mesopic Region, with Regard to Chromatic Effects.
In: CIE, Hrsg., *Proceedings of the CIE Symposium - Vision and Lighting in Mesopic Conditions*, 21 May 2005, Auditorio Municipal of León, Spain, Commission International de l'Éclairage (CIE), Vienna, 2005, ISBN 3901906436.
- [166] TOTZAUER, A.: Kalibrierung und Wahrnehmung von blendfreiem LED-Fernlicht, Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Darmstadt, 2013.
- [167] VAHRENKAMP, R.; MATTFELD, D. C.: *Logistiknetzwerke: Modelle für Standortwahl und Tourenplanung*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, ISBN 9783834969125.
- [168] VARADY, G.; FREIDING, A.; ELOHOLMA, M.; HALONEN, L., ET AL.: Mesopic visual efficiency III: Discrimination threshold measurements.
In: *Lighting Research and Technology*, Vol. 39, 4, 2007, S. 355–364.
- [169] VAS, Z.; BODROGI, P.: Additivity of mesopic photometry.
In: KHANH, T. Q., Hrsg., *Proceedings of the 7th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Utz Verlag GmbH, München, S. 187–194, 2007, ISBN 978-3-8316-0711-2.
- [170] VERDON, W.; ADAMS, A. J.: Short-wavelength-sensitive cones do not contribute to mesopic luminosity.
In: *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 4, 1, 1987, S. 91–95.
-

-
- [171] VIIKARI, M.; ELOHOLMA, M.; HALONEN, L.: 80 Years of V (λ) Use: A Review.
In: Light & Engineering, Vol. 13, 4, 2005, S. 24–36.
- [172] VOIGT, D.: Schlau fahren - Sprit sparen: 44 Praxistipps für jeden Autofahrer, Expert-Verlag, 2004, ISBN 9783816924241.
- [173] VOS, J. J.: Colorimetric and photometric properties of a 2° fundamental observer.
In: Color Research & Application, Vol. 3, 3, 1978, S. 125–128.
- [174] VOS, J. J.; ESTÉVEZ, O.; WALRAVEN, P. L.: Improved color fundamentals offer a new view on photometric additivity.
In: Vision Research, Vol. 30, 6, 1990, S. 937–943.
- [175] VOS, J. J.; WALRAVEN, P. L.: On the derivation of the foveal receptor primaries.
In: Vision Research, Vol. 11, 8, 1971, S. 799–818.
- [176] WAGNER, G.; BOYNTON ROBERT M.: Comparison of Four Methods of Heterochromatic Photometry.
In: Journal of the Optical Society of America, Vol. 62, 12, 1972, S. 1508.
- [177] WALD, G.: Human Vision and the Spectrum.
In: Science (New York, N.Y.), Vol. 101, 2635, 1945, S. 653–658.
- [178] WALD, G.: The Receptors of Human Color Vision – Action spectra of three visual pigments in human cones account for normal color vision and color-blindness.
In: Science, Vol. 145, 1964, S. 1007–1016.
- [179] WALD, G.: Blue-Blindness in the Normal Fovea.
In: Journal of the Optical Society of America, Vol. 57, 11, 1967, S. 1289–1303.
- [180] WESTHEIMER, G.: Retinal Light Distribution for Circular Apertures in Maxwellian View.
In: Journal of the Optical Society of America, Vol. 49, 1, 1959, S. 41.
- [181] WETHERILL, G. B.: Sequential Estimation of Quantal Response Curves.
In: Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological), Vol. 25, 1, 1963, S. 1–48.
- [182] WINNER, H., HAKULI, S., LOTZ, F., SINGER, C., Hrsg.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, ATZ/MTZ Handbuch, Wiesbaden, Springer Fachmedien, 2014.
- [183] WYSZECKI, G.; STILES, W. S.: Color science – Concepts and methods, quantitative data and formulae, New York, Wiley, 2. Aufl., 950 S., 2000, ISBN 0471021067.
- [184] ZWISLER, R.: Der LCTF,
Quelle: <http://www.zwisler.de/diss/node13.html>, 1998, abgerufen am 20.08.2014.
- [185] ZWISLER, R.: Psychophysische Methoden,
Quelle: <http://www.zwisler.de/scripts/methoden/node4.html>, 1998, abgerufen am 11.12.2014.
- [186] ZYDEK, B., SCHILLER, C., POLIN, D., WAGNER, M., KHANH, T.: Evaluation of Adaptive Headlamp Systems,

Quelle: http://www.clepa.eu/index.php?id=530&type=0&juSecure=1&location-Data=530%3Atx_dam%3A6710&juHash=770bf021f3e7aa2dc5040159c1d7a97f62904ef2, 2013, abgerufen am 27.01.2015.

- [187] ZYDEK, B. W.: Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern unter dynamischen Bedingungen, Dissertation.
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Darmstadt, 2014.
- [188] ZYDEK, B. W.; BODROGI, P.; HAUSERKEMPER, N.; KHANH, T. Q.: A new concept of disability glare under traffic lighting conditions: experimental set-up, results and analysis of spectral sensitivity.
In: KHANH, T. Q., Hrsg., Proceedings of the 9th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Utz Verlag GmbH, München, S. 362–371, 2011, ISBN 978-3-8316-4093-5.

Anhang

A	Statistische Auswertung	136
A1	Ausreißer (Boxplots)	136
A2	Intraindividueller Test auf Normalverteilung	138
A3	Interindividueller Test auf Normalverteilung	139
A4	Mauchly's Test auf Sphärizität	140
A5	Zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung	141
	A5.1 Innersubjekteffekte (Interaktion und Haupteffekte)	141
	A5.2 Einfache Haupteffekte für $\theta = 10^\circ$ - $L_0 = 0,1 \text{ cd/m}^2$ (Post-hoc-Tests)	144
A6	Interindividuelle Unterschiede anhand der Rangplatzsummen	145
B	Wertetabellen mit 95 %-Konfidenzintervallen	147
C	Tests auf Farbnormalsichtigkeit	150

A Statistische Auswertung

A1 Ausreißer (Boxplots)

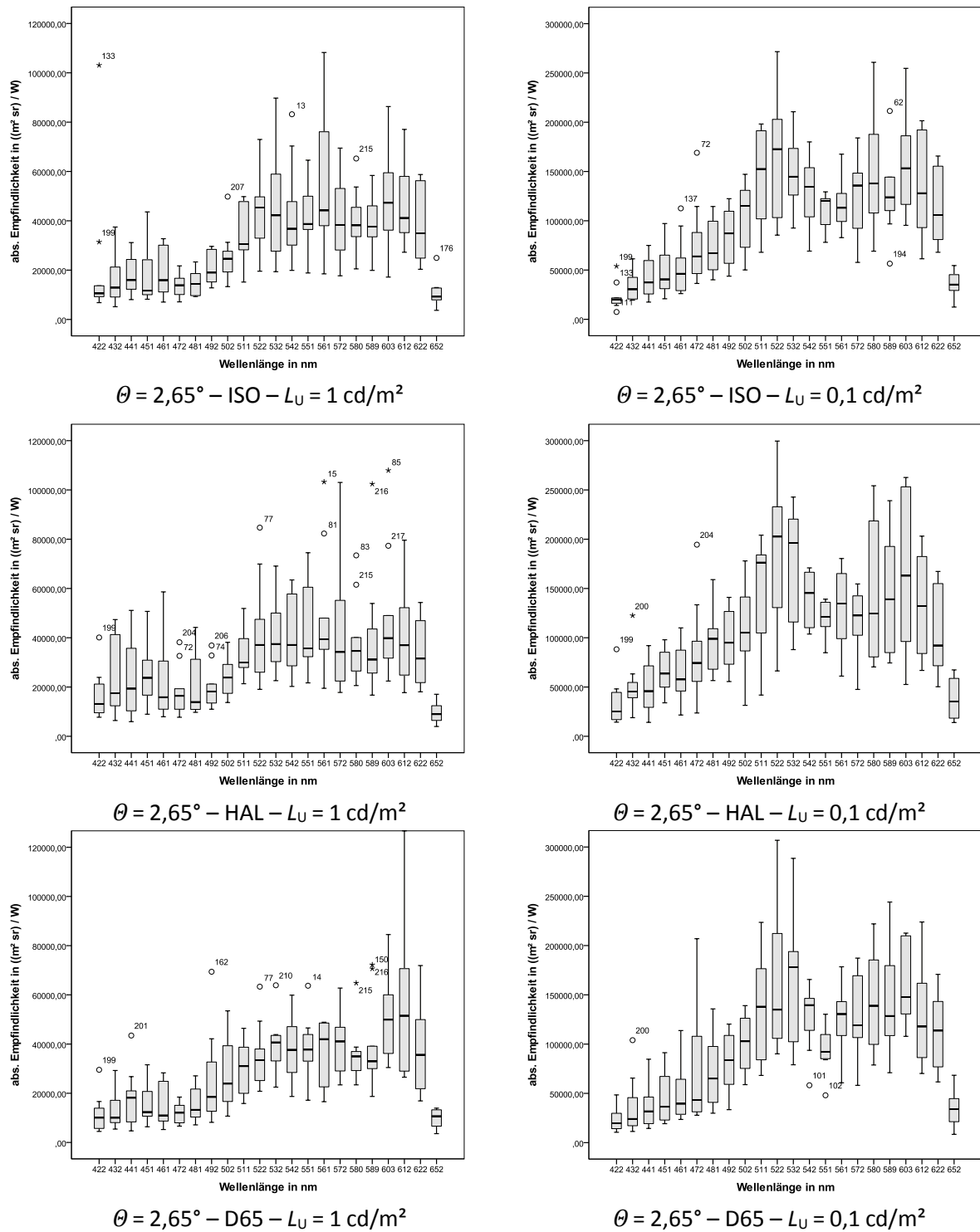
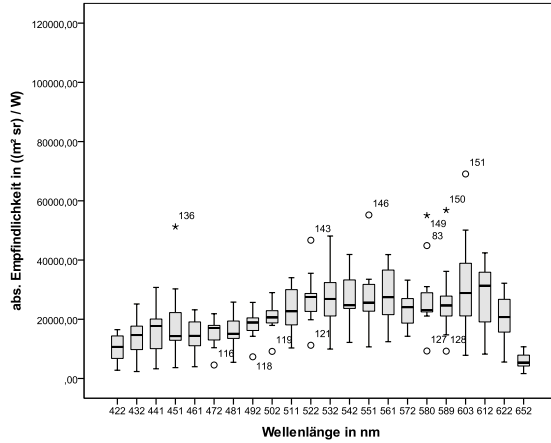
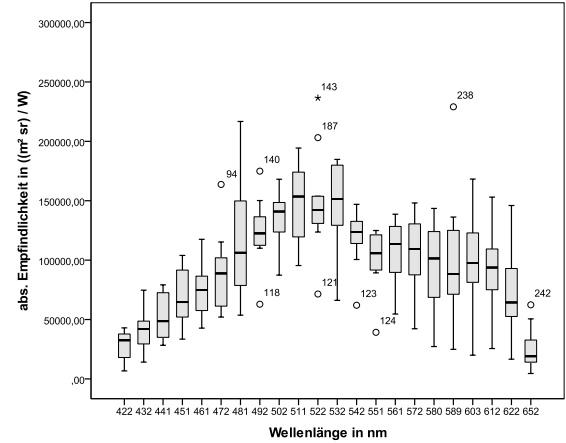


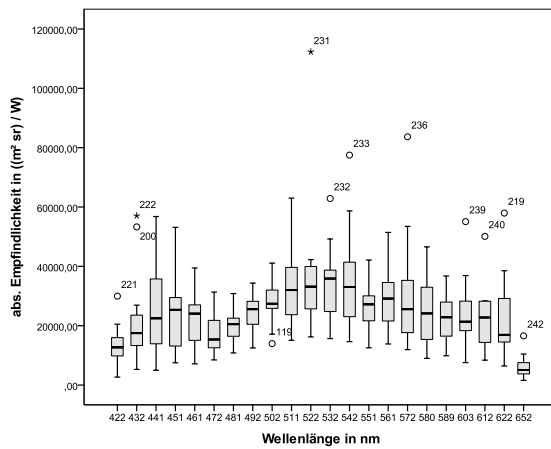
Abbildung A1: Boxplots für den Beobachtungswinkel $\theta = 2,65^\circ$ (10 Testpersonen)



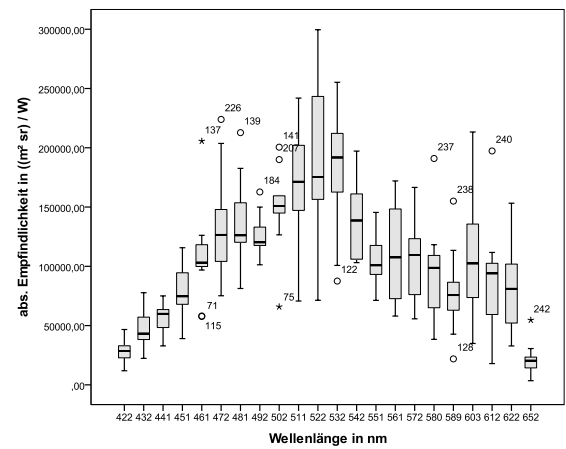
$\theta = 10^\circ - \text{ISO} - L_U = 1 \text{ cd/m}^2$



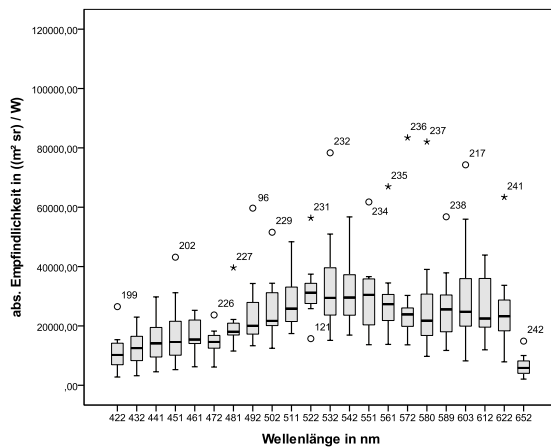
$\theta = 10^\circ - \text{ISO} - L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$



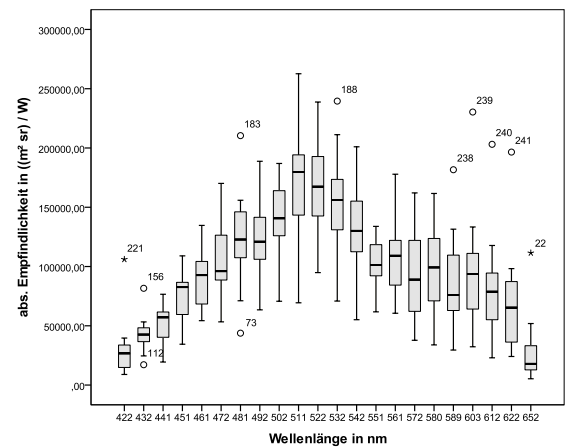
$\theta = 10^\circ - \text{HAL} - L_U = 1 \text{ cd/m}^2$



$\theta = 10^\circ - \text{HAL} - L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$



$\theta = 10^\circ - \text{LED} - L_U = 1 \text{ cd/m}^2$



$\theta = 10^\circ - \text{LED} - L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$

Abbildung A2: Boxplots für den Beobachtungswinkel $\theta = 10^\circ$ (11 Testpersonen)

A2 Intraindividueller Test auf Normalverteilung

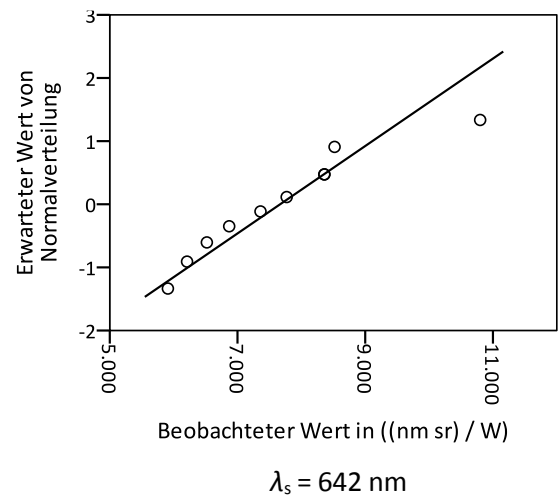
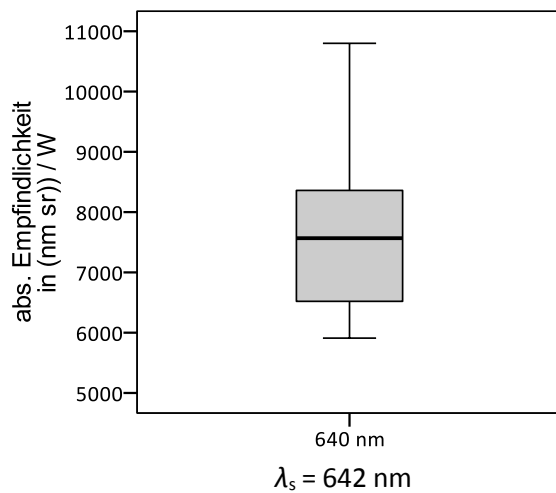
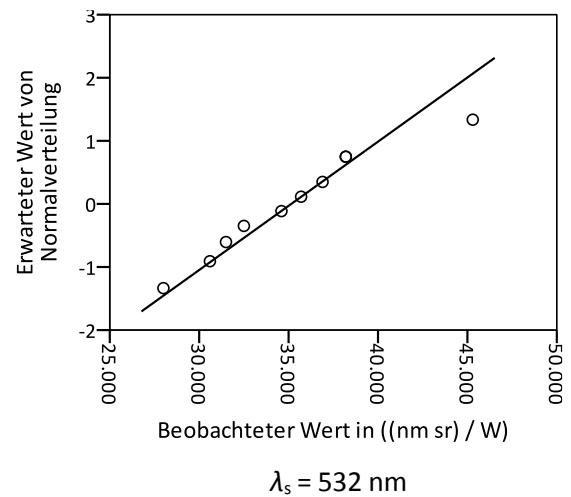
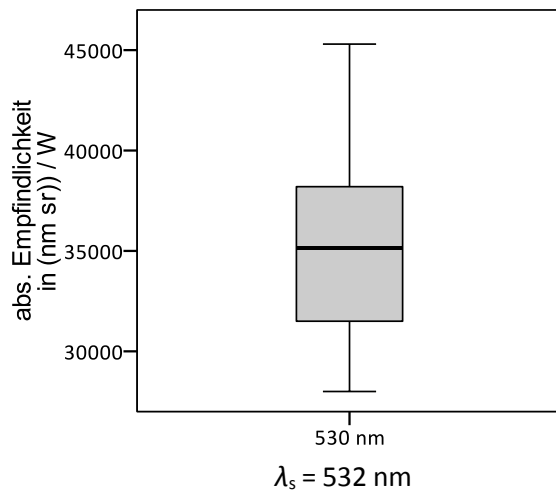
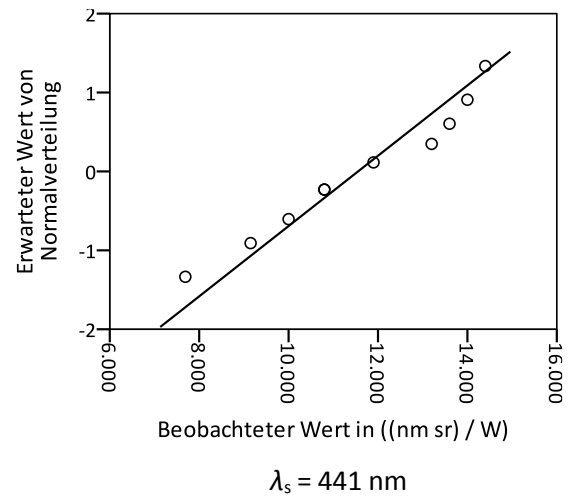
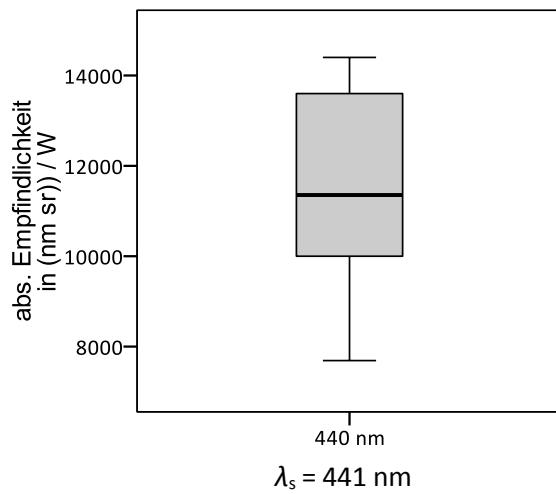


Abbildung A3: Intraindividueller Test auf Normalverteilung - Boxplot und Q-Q-Plot
bei 3 Wellenlängen (1 Testperson; 10 Wiederholungen)

A3 Interindividueller Test auf Normalverteilung

Tabelle A1: Shapiro-Wilk-Test ¹⁾ auf Normalverteilung für alle Parameterkombinationen

λ_s in nm	$\theta = 2,65^\circ$						$\theta = 10^\circ$					
	$L_U = 1 \text{ cd/m}^2$			$L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$			$L_U = 1 \text{ cd/m}^2$			$L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$		
	ISO	HAL	D65	ISO	HAL	D65	ISO	HAL	LED	ISO	HAL	LED
422	,000	,029	,033	,025	,008	,204	,484	,256	,256	,353	1,000	,001
432	,062	,120	,062	,079	,011	,011	,949	,807	,807	,918	,777	,323
441	,559	,351	,177	,372	,546	,080	,946	,853	,853	,273	,429	,348
451	,012	,432	,224	,321	,465	,183	,027	,160	,160	,578	,904	,474
461	,162	,040	,044	,075	,581	,066	,755	,692	,692	,882	,031	,835
472	,865	,091	,465	,037	,201	,002	,410	,955	,955	,295	,353	,923
481	,196	,007	,349	,512	,567	,444	,985	,005	,005	,538	,491	,873
492	,120	,089	,047	,170	,307	,267	,398	,006	,006	,563	,322	,990
502	,102	,626	,306	,382	,992	,395	,380	,082	,082	,418	,070	,218
511	,177	,151	,779	,247	,071	,441	,720	,276	,276	,531	,931	,605
522	,587	,182	,185	,484	,844	,086	,473	,099	,099	,316	,913	,290
532	,552	,543	,339	,660	,201	,197	,788	,064	,064	,095	,701	,973
542	,149	,277	,937	,379	,095	,188	,278	,332	,332	,093	,252	,996
551	,766	,142	,852	,078	,099	,417	,215	,128	,128	,033	,932	,339
561	,187	,044	,025	,516	,297	,483	,398	,006	,006	,286	,221	,432
572	,663	,069	,893	,214	,162	,662	,548	,000	,000	,808	,668	,695
580	,725	,054	,009	,884	,140	,566	,057	,001	,001	,765	,001	,716
589	,783	,005	,013	,013	,495	,543	,090	,217	,217	,211	,557	,527
603	,539	,030	,452	,820	,295	,116	,761	,135	,135	,892	,802	,083
612	,224	,393	,081	,297	,337	,364	,503	,000	,000	,961	,223	,077
622	,053	,389	,242	,106	,073	,567	,750	,019	,019	,834	,608	,025
652	,032	,862	,311	,939	,326	,816	,936	,362	,362	,065	,094	,001

¹⁾ grün: Normalverteilung erfüllt ($p > 0,05$)

A4 Mauchly's Test auf Sphärizität

Mauchly-Test auf Sphärizität für 2,65° - 1 cd/m^{2a}

Maß: MEASURE_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Näherungsw eise Chi- Quadrat	df	Sig.	Epsilon ^b		
					Greenhouse- Geisser	Huynh-Feldt (HF)	Untergrenze
Spektrum	,441	6,547	2	,038	,641	,702	,500
Wellenlänge	,000	.	230	.	,198	,388	,048
Spektrum * Wellenlänge	,000	.	902	.	,116	,270	,024

Testet die Nullhypothese, dass die Fehlerkovarianzmatrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zu einer Identitätsmatrix ist.

- Design: Konstanter Term
Innersubjekt-design: Spektrum + Wellenlänge + Spektrum * Wellenlänge
- Kann für die Anpassung der Freiheitsgrade für die gemittelten Tests auf Signifikanz verwendet werden. Korrigierte Tests werden in der Tabelle 'Tests der Innersubjekteffekte' angezeigt.

Mauchly-Test auf Sphärizität für 2,65° - 0,1 cd/m^{2a}

Maß: MEASURE_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Näherungsw eise Chi- Quadrat	df	Sig.	Epsilon ^b		
					Greenhouse- Geisser	Huynh-Feldt (HF)	Untergrenze
Spektrum	,937	,519	2	,771	,941	1,000	,500
Wellenlänge	,000	.	230	.	,137	,207	,048
Spektrum * Wellenlänge	,000	.	902	.	,118	,280	,024

Testet die Nullhypothese, dass die Fehlerkovarianzmatrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zu einer Identitätsmatrix ist.

- Design: Konstanter Term
Innersubjekt-design: Spektrum + Wellenlänge + Spektrum * Wellenlänge
- Kann für die Anpassung der Freiheitsgrade für die gemittelten Tests auf Signifikanz verwendet werden. Korrigierte Tests werden in der Tabelle 'Tests der Innersubjekteffekte' angezeigt.

Mauchly-Test auf Sphärizität für 10° - 1 cd/m^{2a}

Maß: MEASURE_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Näherungsw eise Chi- Quadrat	df	Sig.	Epsilon ^b		
					Greenhouse- Geisser	Huynh-Feldt (HF)	Untergrenze
Spektrum	,505	6,143	2	,046	,669	,734	,500
Wellenlänge	,000	.	230	.	,141	,206	,048
Spektrum * Wellenlänge	,000	.	902	.	,074	,111	,024

Testet die Nullhypothese, dass die Fehlerkovarianzmatrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zu einer Identitätsmatrix ist.

- Design: Konstanter Term
Innersubjekt-design: Spektrum + Wellenlänge + Spektrum * Wellenlänge
- Kann für die Anpassung der Freiheitsgrade für die gemittelten Tests auf Signifikanz verwendet werden. Korrigierte Tests werden in der Tabelle 'Tests der Innersubjekteffekte' angezeigt.

Mauchly-Test auf Sphärizität für 10° - 0,1 cd/m^{2a}

Maß: MEASURE_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Näherungsw eise Chi- Quadrat	df	Sig.	Epsilon ^b		
					Greenhouse- Geisser	Huynh-Feldt (HF)	Untergrenze
Spektrum	,985	,124	2	,940	,985	1,000	,500
Wellenlänge	,000	.	230	.	,145	,228	,048
Spektrum * Wellenlänge	,000	.	902	.	,115	,265	,024

Testet die Nullhypothese, dass die Fehlerkovarianzmatrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zu einer Identitätsmatrix ist.

a. Design: Konstanter Term

Innersubjekt design: Spektrum + Wellenlänge + Spektrum * Wellenlänge

b. Kann für die Anpassung der Freiheitsgrade für die gemittelten Tests auf Signifikanz verwendet werden. Korrigierte Tests werden in der Tabelle 'Tests der Innersubjekteffekte' angezeigt.

A5 Zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung

A5.1 Innersubjekteffekte (Interaktion und Haupteffekte)

Tests der Innersubjekteffekte für 2,65° - 1 cd/m²

Maß: MEASURE_1

Quelle		Typ III Quadratsum me	df	Quadratische r Mittelwert	F	Sig.	Partielles Eta hoch zwei	Dezent. Parameter	Beobachtete Trennschärfe ^a
Spektrum	Angenommene Sphärizität	680238397,...	2	340119198,...	,737	,492	,076	1,474	,155
	Greenhouse-Geisser	680238397,...	1,283	530196577,...	,737	,442	,076	,946	,131
	Huynh-Feldt (HF)	680238397,...	1,403	484712783,...	,737	,452	,076	1,034	,135
	Untergrenze	680238397,...	1,000	680238397,...	,737	,413	,076	,737	,120
Fehler (Spektrum)	Angenommene Sphärizität	830584519...	18	461435844,...					
	Greenhouse-Geisser	830584519...	11,547	719311659,...					
	Huynh-Feldt (HF)	830584519...	12,630	657604314,...					
	Untergrenze	830584519...	9,000	922871688,...					
Wellenlänge	Angenommene Sphärizität	993769821...	21	473223724...	26,225	,000	,745	550,728	1,000
	Greenhouse-Geisser	993769821...	4,150	239451805...	26,225	,000	,745	108,839	1,000
	Huynh-Feldt (HF)	993769821...	8,145	122009346...	26,225	,000	,745	213,604	1,000
	Untergrenze	993769821...	1,000	993769821...	26,225	,001	,745	26,225	,995
Fehler (Wellenlänge)	Angenommene Sphärizität	341044328...	189	180446734,...					
	Greenhouse-Geisser	341044328...	37,352	913062770,...					
	Huynh-Feldt (HF)	341044328...	73,305	465238469,...					
	Untergrenze	341044328...	9,000	378938143,...					
Spektrum * Wellenlänge	Angenommene Sphärizität	611963071...	42	145705493,...	1,577	,015	,149	66,219	,998
	Greenhouse-Geisser	611963071...	4,879	125439192...	1,577	,188	,149	7,692	,493
	Huynh-Feldt (HF)	611963071...	11,352	539090018,...	1,577	,114	,149	17,898	,778
	Untergrenze	611963071...	1,000	611963071...	1,577	,241	,149	1,577	,203
Fehler (Spektrum*Wellenlänge)	Angenommene Sphärizität	349326568...	378	92414436,0...					
	Greenhouse-Geisser	349326568...	43,907	795604336,...					
	Huynh-Feldt (HF)	349326568...	102,166	341920534,...					
	Untergrenze	349326568...	9,000	388140631,...					

a. Berechnet mit alpha = ,05

Tests der Innersubjekteffekte für 2,65° - 0,1 cd/m²

Maß: MEASURE_1

Quelle		Typ III Quadratsumme	df	Quadratischer Mittelwert	F	Sig.	Partielles Eta hoch zwei	Dezent. Parameter	Beobachtete Trennschärfe ^a
Spektrum	Angenommene Sphärizität	129919049...	2	649595245...	3,036	,073	,252	6,072	,515
	Greenhouse-Geisser	129919049...	1,882	690408199...	3,036	,077	,252	5,713	,497
	Huynh-Feldt (HF)	129919049...	2,000	649595245...	3,036	,073	,252	6,072	,515
	Untergrenze	129919049...	1,000	129919049...	3,036	,115	,252	3,036	,344
Fehler (Spektrum)	Angenommene Sphärizität	385161180...	18	213978433...					
	Greenhouse-Geisser	385161180...	16,936	227422330...					
	Huynh-Feldt (HF)	385161180...	18,000	213978433...					
	Untergrenze	385161180...	9,000	427956866...					
Wellenlänge	Angenommene Sphärizität	129668548...	21	617469280...	44,494	,000	,832	934,379	1,000
	Greenhouse-Geisser	129668548...	2,869	451909751...	44,494	,000	,832	127,669	1,000
	Huynh-Feldt (HF)	129668548...	4,354	297808137...	44,494	,000	,832	193,732	1,000
	Untergrenze	129668548...	1,000	129668548...	44,494	,000	,832	44,494	1,000
Fehler (Wellenlänge)	Angenommene Sphärizität	262284829...	189	138775042...					
	Greenhouse-Geisser	262284829...	25,824	101565854...					
	Huynh-Feldt (HF)	262284829...	39,187	669318103...					
	Untergrenze	262284829...	9,000	291427588...					
Spektrum * Wellenlänge	Angenommene Sphärizität	154260949...	42	367287974...	,808	,799	,082	33,944	,859
	Greenhouse-Geisser	154260949...	4,955	311348856...	,808	,549	,082	4,004	,261
	Huynh-Feldt (HF)	154260949...	11,753	131251174...	,808	,639	,082	9,499	,439
	Untergrenze	154260949...	1,000	154260949...	,808	,392	,082	,808	,127
Fehler (Spektrum*Wellenlänge)	Angenommene Sphärizität	171782510...	378	454451086...					
	Greenhouse-Geisser	171782510...	44,591	385236751...					
	Huynh-Feldt (HF)	171782510...	105,778	162399106...					
	Untergrenze	171782510...	9,000	190869456...					

a. Berechnet mit alpha = ,05

Tests der Innersubjekteffekte für 10° - 1 cd/m²

Maß: MEASURE_1

Quelle		Typ III Quadratsumme	df	Quadratischer Mittelwert	F	Sig.	Partielles Eta hoch zwei	Dezent. Parameter	Beobachtete Trennschärfe ^a
Spektrum	Angenommene Sphärizität	213044899...	2	106522449...	1,861	,181	,157	3,722	,341
	Greenhouse-Geisser	213044899...	1,338	159214739...	1,861	,197	,157	2,490	,273
	Huynh-Feldt (HF)	213044899...	1,468	145087114...	1,861	,194	,157	2,733	,287
	Untergrenze	213044899...	1,000	213044899...	1,861	,202	,157	1,861	,235
Fehler (Spektrum)	Angenommene Sphärizität	114471935...	20	572359677...					
	Greenhouse-Geisser	114471935...	13,381	855482551...					
	Huynh-Feldt (HF)	114471935...	14,684	779572891...					
	Untergrenze	114471935...	10,000	114471935...					
Wellenlänge	Angenommene Sphärizität	357370227...	21	170176298...	17,131	,000	,631	359,751	1,000
	Greenhouse-Geisser	357370227...	2,952	121040206...	17,131	,000	,631	50,579	1,000
	Huynh-Feldt (HF)	357370227...	4,325	826372552...	17,131	,000	,631	74,084	1,000
	Untergrenze	357370227...	1,000	357370227...	17,131	,002	,631	17,131	,961
Fehler (Wellenlänge)	Angenommene Sphärizität	208609979...	210	99338085,5...					
	Greenhouse-Geisser	208609979...	29,525	706555639...					
	Huynh-Feldt (HF)	208609979...	43,246	482383668...					
	Untergrenze	208609979...	10,000	208609979...					
Spektrum * Wellenlänge	Angenommene Sphärizität	668413039...	42	159145961...	2,408	,000	,194	101,139	1,000
	Greenhouse-Geisser	668413039...	3,112	214777993...	2,408	,084	,194	7,494	,555
	Huynh-Feldt (HF)	668413039...	4,680	142832574...	2,408	,054	,194	11,269	,693
	Untergrenze	668413039...	1,000	668413039...	2,408	,152	,194	2,408	,290
Fehler (Spektrum*Wellenlänge)	Angenommene Sphärizität	277571892...	420	66088545,9...					
	Greenhouse-Geisser	277571892...	31,121	891908603...					
	Huynh-Feldt (HF)	277571892...	46,797	593140852...					
	Untergrenze	277571892...	10,000	277571892...					

a. Berechnet mit alpha = ,05

Tests der Innersubjekteffekte für 10° - 0,1 cd/m²

Maß: MEASURE_1

Quelle		Typ III Quadratsum me	df	Quadratische r Mittelwert	F	Sig.	Partielles Eta hoch zwei	Dezent. Parameter	Beobachtete Trennschärfe ^a
Spektrum	Angenommene Sphärizität	296775789...	2	148387894...	4,413	,028	,329	8,827	,684
	Greenhouse-Geisser	296775789...	1,970	150678629...	4,413	,028	,329	8,693	,679
	Huynh-Feldt (HF)	296775789...	2,000	148387894...	4,413	,028	,329	8,827	,684
	Untergrenze	296775789...	1,000	296775789...	4,413	,065	,329	4,413	,467
Fehler (Spektrum)	Angenommene Sphärizität	605201519...	18	336223066...					
	Greenhouse-Geisser	605201519...	17,726	341413503...					
	Huynh-Feldt (HF)	605201519...	18,000	336223066...					
	Untergrenze	605201519...	9,000	672446133...					
Wellenlänge	Angenommene Sphärizität	112466965...	21	535556980...	43,156	,000	,827	906,266	1,000
	Greenhouse-Geisser	112466965...	3,052	368474036...	43,156	,000	,827	131,721	1,000
	Huynh-Feldt (HF)	112466965...	4,795	234527236...	43,156	,000	,827	206,951	1,000
	Untergrenze	112466965...	1,000	112466965...	43,156	,000	,827	43,156	1,000
Fehler (Wellenlänge)	Angenommene Sphärizität	234547617...	189	124099268...					
	Greenhouse-Geisser	234547617...	27,470	853828071...					
	Huynh-Feldt (HF)	234547617...	43,159	543446534...					
	Untergrenze	234547617...	9,000	260608463...					
Spektrum * Wellenlänge	Angenommene Sphärizität	413937499...	42	985565475...	2,473	,000	,216	103,857	1,000
	Greenhouse-Geisser	413937499...	4,835	856093298...	2,473	,048	,216	11,956	,712
	Huynh-Feldt (HF)	413937499...	11,129	371930794...	2,473	,009	,216	27,521	,948
	Untergrenze	413937499...	1,000	413937499...	2,473	,150	,216	2,473	,291
Fehler (Spektrum*Wellenlänge)	Angenommene Sphärizität	150657995...	378	398566125...					
	Greenhouse-Geisser	150657995...	43,517	346207124...					
	Huynh-Feldt (HF)	150657995...	100,165	150410114...					
	Untergrenze	150657995...	9,000	167397772...					

a. Berechnet mit alpha = ,05

A5.2 Einfache Haupteffekte für $\theta = 10^\circ$ - $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ (Post-hoc-Tests)

Tabelle A2: Einfache Haupteffekte für den Faktor Adaptationsspektrum

λ_s in nm	Übergeordnete Signifikanz (p -Wert)	Paarweise Vergleiche	
		ISO - HAL	ISO - LED
422	0,695	-	-
432	0,598	-	-
441	0,534	-	-
451	0,155	-	-
461	0,003	0,021	0,044
472	0,037	-	-
481	0,316	-	-
492	0,841	-	-
502	0,021	0,019	-
511	0,008	-	0,032
522	0,017	0,018	-
532	0,002	0,006	-
542	0,019	-	-
551	0,616	-	-
561	0,380	-	-
572	0,480	-	-
580	0,420	-	-
589	0,111	-	-
603	0,261	-	-
612	0,870	-	-
622	0,717	-	-
652	0,450	-	-

A6 Interindividuelle Unterschiede anhand der Rangplatzsummen

Ränge

	Observer	H	Mittlerer Rang
MW	1,00	22	108,73
	2,00	22	102,32
	3,00	22	148,91
	4,00	22	131,73
	5,00	22	67,45
	7,00	22	100,82
	9,00	22	124,05
	10,00	22	110,95
	11,00	22	159,82
	13,00	22	50,23
	Gesamtsumme	220	

$$\theta = 2,65^\circ - \text{ISO} - L_U = 1 \text{ cd/m}^2$$

Ränge

	Observer	H	Mittlerer Rang
MW	1,00	22	99,73
	2,00	22	106,59
	3,00	22	137,86
	4,00	22	140,91
	5,00	22	69,11
	7,00	22	85,73
	9,00	22	152,64
	10,00	22	115,82
	11,00	22	132,52
	13,00	22	64,09
	Gesamtsumme	220	

$$\theta = 2,65^\circ - \text{ISO} - L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$$

Ränge

	Observer	H	Mittlerer Rang
MW	1,00	22	151,36
	2,00	22	91,39
	3,00	22	125,14
	4,00	22	163,59
	5,00	22	59,93
	7,00	22	74,91
	9,00	22	115,05
	10,00	22	87,05
	11,00	22	178,41
	13,00	22	58,18
	Gesamtsumme	220	

$$\theta = 2,65^\circ - \text{HAL} - L_U = 1 \text{ cd/m}^2$$

Ränge

	Observer	H	Mittlerer Rang
MW	1,00	22	102,05
	2,00	22	121,39
	3,00	22	131,82
	4,00	22	123,95
	5,00	22	54,50
	7,00	22	73,32
	9,00	22	146,41
	10,00	22	121,20
	11,00	22	164,45
	13,00	22	65,91
	Gesamtsumme	220	

$$\theta = 2,65^\circ - \text{HAL} - L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$$

Ränge

	Observer	H	Mittlerer Rang
MW	1,00	22	127,57
	2,00	22	99,45
	3,00	22	136,45
	4,00	22	137,66
	5,00	22	58,50
	7,00	22	80,18
	9,00	22	127,91
	10,00	22	98,68
	11,00	22	161,36
	13,00	22	77,23
	Gesamtsumme	220	

$$\theta = 2,65^\circ - \text{D65} - L_U = 1 \text{ cd/m}^2$$

Ränge

	Observer	H	Mittlerer Rang
MW	1,00	22	88,91
	2,00	22	112,05
	3,00	22	132,00
	4,00	22	156,00
	5,00	22	58,82
	7,00	22	84,36
	9,00	22	145,14
	10,00	22	106,82
	11,00	22	152,36
	13,00	22	68,55
	Gesamtsumme	220	

$$\theta = 2,65^\circ - \text{D65} - L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$$

Abbildung A4: Rangplatzsummen für den Beobachtungswinkel $\theta = 2,65^\circ$ (10 Testpersonen)

Ränge

Observer	H	Mittlerer Rang
MW 1,00	22	140,91
2,00	22	70,77
3,00	22	97,64
5,00	22	122,07
6,00	22	140,95
7,00	22	24,27
8,00	22	181,36
9,00	22	149,32
10,00	22	107,84
12,00	22	141,27
14,00	22	160,09
Gesamtsumme	242	

$$\theta = 10^\circ - \text{ISO} - L_U = 1 \text{ cd/m}^2$$

Ränge

Observer	H	Mittlerer Rang
MW 1,00	22	92,95
2,00	22	78,64
3,00	22	98,32
6,00	22	131,23
7,00	22	39,32
8,00	22	142,23
9,00	22	117,34
10,00	22	134,23
12,00	22	134,57
14,00	22	136,18
Gesamtsumme	220	

$$\theta = 10^\circ - \text{ISO} - L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$$

Ränge

Observer	H	Mittlerer Rang
MW 1,00	22	135,55
2,00	22	58,43
3,00	22	115,39
5,00	22	58,16
6,00	22	123,50
7,00	22	34,41
8,00	22	151,95
9,00	22	141,80
10,00	22	122,55
12,00	22	189,36
14,00	22	205,41
Gesamtsumme	242	

$$\theta = 10^\circ - \text{HAL} - L_U = 1 \text{ cd/m}^2$$

Ränge

Observer	H	Mittlerer Rang
MW 1,00	22	134,91
2,00	22	94,59
3,00	22	123,55
5,00	22	75,36
6,00	22	108,73
7,00	22	60,50
8,00	22	157,09
9,00	22	120,73
10,00	22	153,73
12,00	22	135,36
14,00	22	171,95
Gesamtsumme	242	

$$\theta = 10^\circ - \text{HAL} - L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$$

Ränge

Observer	H	Mittlerer Rang
MW 1,00	22	144,09
2,00	22	72,70
3,00	22	110,45
5,00	22	92,05
6,00	22	125,14
7,00	22	38,75
8,00	22	154,95
9,00	22	141,14
10,00	22	86,91
12,00	22	171,95
14,00	22	198,36
Gesamtsumme	242	

$$\theta = 10^\circ - \text{LED} - L_U = 1 \text{ cd/m}^2$$

Ränge

Observer	H	Mittlerer Rang
MW 1,00	22	153,82
2,00	22	83,09
3,00	22	119,68
5,00	22	56,82
6,00	22	133,09
7,00	22	56,32
8,00	22	119,82
9,00	22	132,68
10,00	22	162,91
12,00	22	149,14
14,00	22	169,14
Gesamtsumme	242	

$$\theta = 10^\circ - \text{LED} - L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$$

Abbildung A5: Rangplatzsummen für den Beobachtungswinkel $\theta = 10^\circ$ (11 Testpersonen)

B Wertetabellen mit 95 %-Konfidenzintervallen

λ_s in nm	Mittelwerte der absoluten Schwellenempfindlichkeiten; alle Angaben in (m ² ·sr)/W											
	$\theta = 2,65^\circ; L_U = 1 \text{ cd/m}^2$						$\theta = 2,65^\circ; L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$					
	ISO		HAL		D65		ISO		HAL		D65	
	MW	± KI	MW	± KI	MW	± KI	MW	± KI	MW	± KI	MW	± KI
422	21570	21077	16670	7027	11416	5346	23094	9452	32682	16218	23183	8627
432	16694	8050	23487	11139	13679	5809	35173	11366	50637	20161	35992	20633
441	17746	5274	23587	10615	17675	8293	42885	14910	48205	18463	38150	17034
451	17504	7982	26490	9849	16008	6051	49187	17860	65514	15759	45229	18404
461	18712	6908	23799	12402	15085	6187	53765	21222	65528	21637	50472	20121
472	13739	3364	18058	7225	11704	2877	75558	28517	85593	34562	68309	41351
481	15006	3692	19279	8547	15679	5063	72646	18618	97611	23206	71941	26056
492	20472	4746	19785	6269	25697	13447	84700	21213	96926	21926	83821	21216
502	25812	7159	23866	5519	27576	9520	105595	24733	108030	30051	101702	19952
511	32956	8803	33845	7469	30063	7255	144494	35135	147808	37798	136859	38693
522	42575	10829	42217	14905	35116	9467	167271	46890	187283	51167	158564	51188
532	45267	15316	40733	10171	39557	7937	149836	25700	177367	38781	161061	46233
542	43139	14080	41367	11575	38103	8990	128614	27422	142067	19210	128108	22891
551	40221	9413	44730	13762	38135	8988	110490	12612	118104	14018	95972	17269
561	52380	20188	46928	18868	37531	9124	117933	19878	126531	31153	121825	25346
572	40608	12025	43269	19517	40973	8762	124011	28446	113700	25937	126499	30867
580	39229	9675	38265	12072	35687	8124	148451	41701	146942	49837	143630	35766
589	40005	8359	38862	17759	39445	12740	144637	54636	145673	41983	140582	40763
603	49483	15839	47348	18890	52561	13195	159081	35291	163951	56622	161200	28660
612	46241	12208	40544	14294	57276	23604	138140	36275	132316	36856	126547	36885
622	39425	11229	34499	9419	37345	13101	112249	26481	106810	33765	112491	26944
652	10650	4106	9488	2931	10054	2480	35173	9420	36991	14031	34829	13266

λ_s in nm	Mittelwerte der absoluten Schwellenempfindlichkeiten; alle Angaben in (m ² ·sr)/W											
	$\theta = 10^\circ; L_U = 1 \text{ cd/m}^2$						$\theta = 10^\circ; L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$					
	ISO		HAL		LED		ISO		HAL		LED	
	MW	± KI	MW	± KI	MW	± KI	MW	± KI	MW	± KI	MW	± KI
422	10544	3142	13378	5005	11226	4376	28880	8804	28392	6504	30685	18150
432	13965	4426	22960	11339	12811	4280	41738	12234	46704	10515	43200	11175
441	16307	5325	24946	10342	15206	4896	52288	13328	55148	8765	50258	12128
451	18967	8632	23945	8997	18154	7496	69475	16502	77506	15333	72822	15239
461	14990	3975	22650	6287	16956	3961	74666	16101	109455	26291	88897	16574
472	15090	3219	17739	5177	14602	3048	91206	23437	133586	31217	106833	22929
481	15862	3680	20307	3653	19707	4979	117035	35814	135324	26028	123628	29651
492	17964	3128	24071	4777	24965	8905	124196	20947	125548	12255	122457	23599
502	20905	3520	28175	5376	25600	7328	132959	17697	149582	23291	137851	25800
511	23293	4879	33891	10117	28297	6241	148659	24192	169065	33798	166619	36424
522	26993	6036	46551	25468	32137	6669	149033	31907	190811	46683	175108	43146
532	27090	7117	34444	9163	34497	12058	148410	26658	190109	44949	153749	32394
542	27583	6278	36388	12760	31394	7441	118583	17021	140324	22206	131010	28218
551	27664	7753	26727	5648	30175	8791	100849	18077	104486	14894	101742	15702
561	28473	6908	28985	7453	28876	9504	105759	20938	113577	27697	106359	22654
572	23190	4213	31548	14028	27850	12794	103767	24082	102551	22379	94530	27434
580	27805	8336	25043	7957	27779	13310	96446	25764	116348	63545	98983	27760
589	26246	8303	22874	6036	26456	8730	98331	40370	78377	23626	87243	29988
603	32073	11560	24242	8889	31251	12908	95674	29725	107127	34171	98318	35542
612	28169	7638	23117	7761	37840	27772	89845	25752	88682	30991	84012	31884
622	20860	5540	22752	10323	25802	9635	71295	25760	78948	24535	72469	32755
652	5951	1848	6414	2825	6566	2467	24810	13178	21139	9010	29067	20619

Mittelwerte der absoluten Schwellenempfindlichkeiten; alle Angaben in (m ² ·sr)/W für spektrale Empfindlichkeiten ohne signifikanten Unterschied						
$\theta = 2,65^\circ$						
$L_0 = 1 \text{ cd/m}^2$						
$L_0 = 0,1 \text{ cd/m}^2$						
λ_s in nm	HAL+D65+ISO		HAL+D65+ISO		HAL+ISO+LED	
	MW	± KI	MW	± KI	MW	± KI
422	16552	6829	26320	6246	11716	2213
432	17953	4610	40601	9411	16579	4143
441	19669	4336	43080	8637	18820	4041
451	20001	4447	53310	9366	20355	4390
461	19199	4703	56588	10859	18199	2748
472	14500	2661	76486	17933	15810	2071
481	16654	3163	80733	12362	18625	2236
492	21985	4639	88482	11042	22334	3316
502	25751	3861	105109	12757	24893	3073
511	32288	4012	143054	18837	28494	4099
522	39969	6163	171039	25490	35227	8508
532	41852	5898	162755	19550	32010	5094
542	40870	5963	132929	12047	31788	4910
551	41029	5606	108189	8212	28189	3874
561	45613	8777	122096	13099	28778	4106
572	41616	7151	121403	14502	27530	5869
580	37727	5113	146341	21583	26875	5215
589	39437	6807	143630	23295	25192	4020
603	49797	8171	161410	21129	29189	5884
612	48020	9162	132334	18558	29709	9072
622	37090	5768	110517	14768	23138	4535
652	10064	1645	35664	6258	6310	1237

C Tests auf Farbnormalsichtigkeit

Vor den durchgeführten Untersuchungen wurde mit den Testpersonen eine Prüfung auf Normalsichtigkeit durchgeführt. Dazu wurden das Farnsworth Panel D-15 (vgl. LINKSZ 1966 [113]), das Lanthony Desaturated Panel D-15 (vgl. LANTHONY 1978 [109]) sowie Farbtafeln (vgl. ICHIKAWA et al. 1983 [82], ICHIKAWA et al. 1979 [83]) verwendet.



Abbildung A6: Farblegetests nach LINKSZ 1966 [113] und LANTHONY 1978 [109]

oben: Farnsworth Panel D-15

unten: Lanthony Desaturated Panel D-15

Bildquelle: BRÜCKNER 2014 [18]

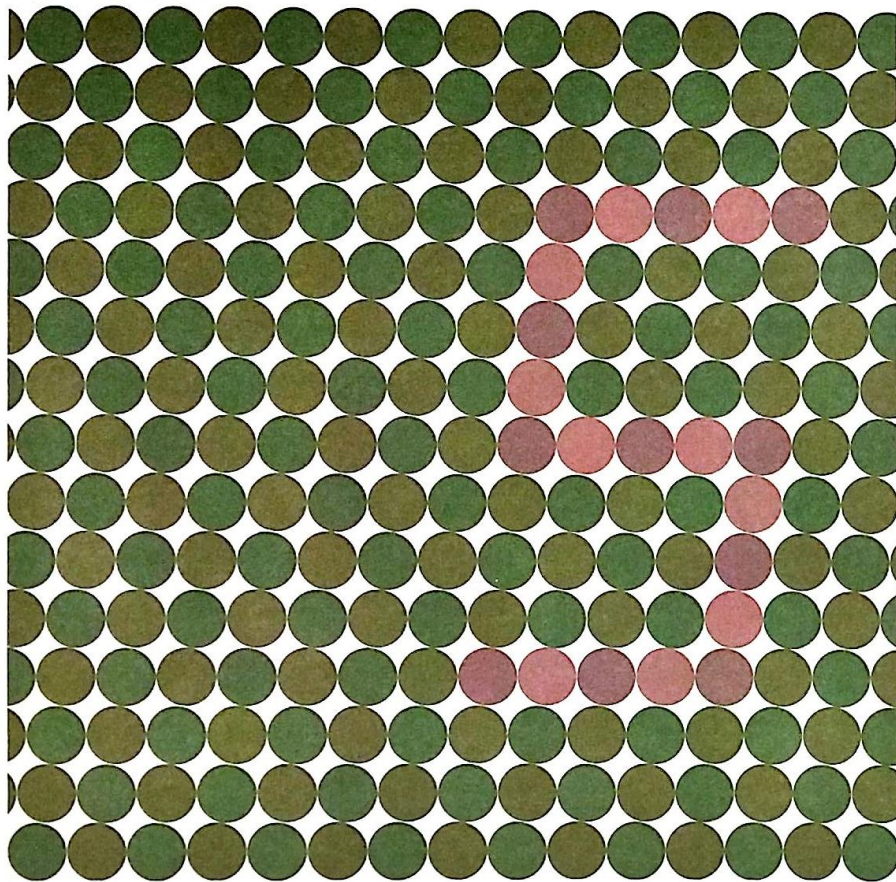


Abbildung A7: Farbtafel (Beispiel) nach ICHIKAWA et al. 1979 [83], ICHIKAWA et al. 1983 [82]
zur Prüfung auf rot-grün-Schwäche

Veröffentlichungen und betreute Arbeiten

Beiträge in Büchern

KHANH, T. Q.; BODROGI, P.; BRÜCKNER, S.; HAFERKEMPER, N.; SCHILLER, C.: Mesopic Perceptual Aspects of LED Lighting.

In: KHANH, T. Q. et al., Hrsg., LED Lighting - Technology and Perception, Wiley, Hoboken, 2014, ISBN 978-3-527-41212-9.

KHANH, T. Q., BODROGI, P., VINH, Q. T., WINKLER, H., Hrsg.: LED Lighting – Technology and Perception, Hoboken, Wiley, 517 S., 2014, ISBN 978-3-527-41212-9.

PEPLER, W., SCHILLER, C., KHANH, T. Q., Hrsg.: Kommunen in neuem Licht – Praxiserfahrungen zur LED in der kommunalen Beleuchtung, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Projektes »EvalKomm« (Förderkennzeichen 13N11100), Düsseldorf, Siebel Druck und Grafik, 44 S., 2013.

SCHILLER, C.; KUHN, T.; BRÜCKNER, S.; KHANH, T. Q.: Straßenbeleuchtung mit LED – 53. Erg.-Lfg. 9/2011 Kap. III.1.1.2.1.20.

In: LANGE, H., Hrsg., Handbuch für Beleuchtung, Ecomed, Landsberg, ISBN 3-609-75390-0.

SCHILLER, C.; KUHN, T.; BRÜCKNER, S.; KHANH, T. Q.: Straßenbeleuchtung mit LED – 52. Erg.-Lfg. 6/2011 Kap. III.1.1.2.

In: LANGE, H., Hrsg., Handbuch für Beleuchtung, Ecomed, Landsberg, ISBN 3-609-75390-0.

Patente

KHANH, T., KUHN, T., SCHILLER, C., KUTSCHENKO, W.: Straßenleuchte, DE 10 2010 052 852 A1, 29.11.2010.

Veröffentlichungen in Zeitschriften

BODROGI, P.; SCHILLER, C.; KHANH, T. Q.: Testing the CIE system for mesopic photometry in a threshold detection experiment.

In: Lighting Research and Technology (LRT), als Beitrag "online first" freigegeben am 20.07.2015; doi:10.1177/1477153515595672.

BODROGI, P.; VAS, Z.; HAFERKEMPER, N.; VÁRADY, G.; SCHILLER, C.; KHANH, T. Q.; SCHANDA, J.: Effect of chromatic mechanisms on the detection of mesopic incremental targets at different eccentricities.

In: Ophthalmic and Physiological Optics, Vol. 30, 1, 2010, S. 85–94.

HAFERKEMPER, N.; SPRUTE, J. H.; SCHILLER, C.; KHANH, T. Q.: Untersuchung der Auffälligkeit, Erkennbarkeit und Geschwindigkeitseinschätzung von Motorrädern mit LED-Tagfahrlicht.

In: Verkehrsunfall- und Fahrzeugtechnik (VKU), Vol. 48, 3, 2010, S. 80–86.

HAFERKEMPER, N.; SPRUTE, J. H.; SCHILLER, C.; KHANH, T. Q.: Untersuchung zum Einsatz von LED-Tagfahrlicht an Motorrädern.

In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Vol. 112, 2, 2010, S. 124–130.

KHANH, T. Q.; BÖLL, M.; SCHILLER, C.; HAVERKEMPER, N.: Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung im mesopischen Bereich.

In: Licht, Vol. 60, 3, 2008, S. 214–219.

KHANH, T. Q.; SCHILLER, C.; KUHN, T.; BÖLL, M.: Strassenbeleuchtung mit konventionellen Lichtquellen und LEDs im Vergleich – Lichttechnischer Praxisbericht einer wissenschaftlich begleiteten Teststrasse in Darmstadt.

In: Bulletin : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse und VSE, Vol. 100, 9, 2009, S. 29–32.

KUHN, T.; HAVERKEMPER, N.; SCHILLER, C.; GROH, A.; KHANH, T. Q.: LEDs für die Außenbeleuchtung – Effiziente und deutlich langlebigere Alternative zu Gasentladungsröhren.

In: energy 2.0, 4, 2008, S. 51–55.

KUHN, T.; KHANH, T. Q.; SCHILLER, C.: LED in der Straßenbeleuchtung – Ein Rückblick auf die Darmstädter Fachtage für Beleuchtung.

In: Licht, Vol. 63, 1-2, 2011, S. 53–60.

KUHN, T.; SCHILLER, C.; KHANH, T. Q.: Eine Analyse aktueller LED-Straßenleuchten aus lichttechnischer Sicht.

In: Licht, Vol. 61, 1-2, 2009, S. 88–93.

KUHN, T.; SCHILLER, C.; KHANH, T. Q.: Kosten sparen, Umwelt schützen – Feld- und Labortests zur lichttechnischen Bestimmung von Energiesparpotentialen in der heutigen Straßenbeleuchtung mit konventionellen Technologien.

In: Licht, Vol. 61, 5, 2009, S. 382–387.

SCHILLER, C.: 50 Jahre Forschung, Entwicklung und Lehre in der Lichttechnik an der Technischen Universität Darmstadt.

In: Licht, Vol. 59, 3, 2007, S. 188–192.

SCHILLER, C.; BODROGI, P.; KHANH, T. Q.: Mesopic increment detection sensitivity for quasi-monochromatic targets at threshold Part I: Method and Phenomenological Analysis.

In: Journal of the Optical Society of America A, als Beitrag eingereicht am 25.02.2015; Manuscript ID: 235270.

SCHILLER, C.; KHANH, T. Q.: Psychologische Blendung bei Halogen- und Xenonscheinwerfern.

In: Verkehrsunfall- und Fahrzeugtechnik, Vol. 46, 9, 2008, S. 253–259.

SCHILLER, C.; KUHN, T.; BÖLL, M.; KHANH, T. Q.: Straßenbeleuchtung mit LEDs und konventionellen Lichtquellen im Vergleich – Eine licht- und wahrnehmungstechnische Analyse einer Teststraße in Darmstadt.

In: Licht, Vol. 61, 10, 2009, S. 740–746.

SCHILLER, C.; KUHN, T.; KHANH, T. Q.: LED-Teststraße in Darmstadt.

In: VWEW, Hrsg., Tagungsband 7. Fachtagung Straßen- und Außenbeleuchtung 2009, S. 41–49, 2009.

SCHILLER, C.; KUHN, T.; KHANH, T. Q.: Unter Beobachtung – TU Darmstadt errichtet Teststraße mit verschiedenen Leuchten.

In: TEC21, 01-02, 2010, S. 13–16.

SCHILLER, C.; KUHN, T.; KUTSCHENKO, W.; BRÜCKNER, S.; KHANH, T. Q.: Lichttechnische und technologische Aspekte der LED-Straßenbeleuchtung.

In: Licht, Vol. 62, 7-8, 2010, S. 536–542.

SCHILLER, C.; SPRUTE, J. H.; HAUSERKEMPER, N.; BODROGI, P.; KHANH, T. Q.: Psychologische Blendung bei Halogen- und Xenonscheinwerfern.

In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Vol. 111, 2, 2009, S. 132–138.

SCHILLER, C.; SPRUTE, J. H.; HAUSERKEMPER, N.; KHANH, T. Q.: Discomfort Glare - Impact of Headlamp Optics, Spectrum of Adaptation and SPD.

In: Svetotekhnika, 2, 2010, S. 24–27.

SCHILLER, C.; SPRUTE, J. H.; HAUSERKEMPER, N.; KHANH, T. Q.: Discomfort Glare - Impact of Headlamp Optics, Spectrum of Adaptation and SPD.

In: Light & Engineering, Vol. 18, 2, 2010, S. 25–29.

SPRUTE, J. H.; SÖLLNER, S.; SCHILLER, C.; ZYDEK, B. W.; KHANH, T. Q.: Investigations on Glare at Long Distances.

In: Light & Engineering, Vol. 18, 2, 2010, S. 33–38.

ZYDEK, B. W.; SCHILLER, C.; POLIN, D.; KHANH, T. Q.: Bewertung von Scheinwerfern mit blendfreiem Fernlicht.

In: Verkehrsunfall- und Fahrzeugtechnik (VKU), Vol. 52, 10, 2014.

ZYDEK, B. W.; SCHILLER, C.; POLIN, D.; KHANH, T. Q.: Bewertung von Scheinwerfern mit blendfreiem Fernlicht.

In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Vol. 116, 6, 2014, S. 64.

ZYDEK, B. W.; SCHILLER, C.; POLIN, D.; KHANH, T. Q.: Evaluation of Headlamps with a Glare-Free High Beam Function.

In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Vol. 116, 6, 2014, S. 46–51.

Tagungsbeiträge

BODROGI, P.; BÖLL, M.; SCHILLER, C.; KHANH, T. Q.: Brightness appearance of automotive front lighting light sources – a series of visual experiments.

In: KHANH, T. Q., Hrsg., Proceedings of the 8th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Utz Verlag GmbH, München, S. 65–71, 2009, ISBN 978-3-8316-0904-8.

BODROGI, P.; VAS, Z.; SCHILLER, C.; KHANH, T. Q.: Psycho-physical evaluation of a chromatic model of mesopic visual performance.

In: IS&T, Hrsg., CGIV 2008 and MCS'08 final program and proceedings - 9.-13. Juni 2008, Terrassa, Spain, Curran, Red Hook, NY, S. 194–197, 2008, ISBN 1605607029.

HAFERKEMPER, N.; SCHILLER, C.; SPRUTE, J. H.; KHANH, T. Q.: The Effect of LED Daytime Running Lights on Motorcycle Conspicuity and Detection Distance Estimation - Latest Test Results – SAE Technical Paper 2010-01-0126.

In: SAE INTERNATIONAL, Hrsg., Proceedings of the SAE World Congress 2010, Warrendale, PA, 2010.

HAFERKEMPER, N.; SPRUTE, J. H.; SCHILLER, C.; KHANH, T. Q.: Experiment Series on the Effect of DRL usage on Motorcycle Conspicuity.

In: KHANH, T. Q., Hrsg., Proceedings of the 8th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Utz Verlag GmbH, München, S. 132–140, 2009, ISBN 978-3-8316-0904-8.

KHANH, T. Q.; BODROGI, P.; HAFAERKEMPER, N.; SCHILLER, C.: LED-Licht in der Verkehrs- und Straßenbeleuchtung – Aktuelle Untersuchungen zur Wahrnehmung und Nutzerakzeptanz.

In: VDI, Hrsg., Tagungsband 7. VDI-Fachtagung Innovative Beleuchtung mit LED, VDI, Düsseldorf, 2009.

KHANH, T. Q.; SCHILLER, C.: Energiesparoption LED: Technik & Wirtschaftlichkeit.

In: ABGNOVA, Hrsg., Tagungsband zur Fachtagung Energiesparoption LED - Effizientere Leuchtmittel - aktueller Stand, Frankfurt a. M., 2010.

KHANH, T. Q.; SCHILLER, C.: Forschung und Innovation für eine energieeffiziente und physiologieorientierte Verkehrs- und Kfz-Lichttechnik.

In: LiTG, Hrsg., Tagungsband LICHT 2008 - Ilmenau, 10. bis 13. September; 18. Gemeinschaftstagung, LiTG, Berlin, 2008, ISBN 978-3-927787-34-6.

KUHN, T.; SCHILLER, C.; HAFAERKEMPER, N.; KHANH, T. Q.: LED-street lighting- technological, energy, lighting aspects and results of real tests on the roads.

In: ATMK, Hrsg., Proceedings LUX Europa, Turkish National Committee on Illumination (ATMK), Istanbul, 2009, ISBN 978-975-561-352-9.

KUHN, T.; SCHILLER, C.; KHANH, T. Q.: Feldmessungen an Fahrbahnbelägen von deutschen Straßen und Konsequenzen auf eine energieeffiziente Straßenbeleuchtung.

In: LiTG, Hrsg., Tagungsband LICHT 2010 - Wien, 17. bis 20. Oktober; 19. Gemeinschaftstagung, LTG, Wien, 2010, ISBN 978-3-927787-34-6.

RINGELSTEIN, M.; SCHILLER, C.: Potenziale in der Straßenbeleuchtung von heute - Ergebnisse aus Wissenschaft und Praxis.

In: EUROFORUM, Hrsg., 4. Euroforum-Jahrestagung "Straßenbeleuchtung" - Effizienz gewinnt: Mehr Licht mit weniger Strom, Düsseldorf, 2008.

SCHILLER, C.: Lichttechnisch-physiologische Vergleiche der LED Technologie mit konventionen Straßenbeleuchtungstechniken auf der Basis einer realen Teststrecke in Darmstadt.

In: HDT, Hrsg., Tagungsband 6. Tagung LED in der Lichttechnik, Essen, 2010.

SCHILLER, C.; BÖLL, M.; BODROGI, P.; KHANH, T. Q.: Detection and Conspicuity of Road Markings – Impact of Spectral Power Distribution.

In: SIA, Hrsg., VISION Proceedings, Suresnes Cedex, 2010.

SCHILLER, C.; BÖLL, M.; KHANH, T. Q.: Wirkung von Lampenspektren auf die Detektion von Fahrbahnmarkierungen bei Nacht.

In: LiTG, Hrsg., Tagungsband LICHT 2010 - Wien, 17. bis 20. Oktober; 19. Gemeinschaftstagung, LTG, Wien, 2010, ISBN 978-3-927787-34-6.

SCHILLER, C.; KHANH, T. Q.: Grundlagen der Normung für ein Performance-Quality-Label (PQL) für LED-Leuchten.

In: VDE/ZVEI, Hrsg., Tagungsband der Veranstaltung LED-Anwendungen in der allgemeinen Beleuchtung, Offenbach, 2011.

SCHILLER, C.; KHANH, T. Q.: First Field Tests of Cars with Completely Built-in LED Headlamps under Realistic Driving Conditions.

In: KHANH, T. Q., Hrsg., Proceedings of the 7th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Utz Verlag GmbH, München, S. 131–138, 2007, ISBN 978-3-8316-0711-2.

SCHILLER, C.; KHANH, T. Q.: Photometrical and Physiological Aspects of Today's LED Car Headlamps.

In: SIA, Hrsg., VISION Proceedings, Suresnes Cedex, 2008.

SCHILLER, C.; KUHN, T.; BÖLL, M.; BODROGI, P.; KHANH, T. Q.: LED Street Lights for a Medium-Size Town in Germany – Energy Saving Potential, Lighting Quality and User Acceptance.

In: CIE, Hrsg., Proceedings of CIE 2010 "Lighting Quality and Energy Efficiency", CIE x035:2010, CIE, Wien, S. 307–312, 2010, ISBN 978 3 901906 83 1.

SCHILLER, C.; KUHN, T.; KHANH, T. Q.: LED-Beleuchtung für die Straße – Stand der Technik und der Lichttechnik?

In: VDI, Hrsg., Tagungsband 8. VDI-Fachtagung Innovative Beleuchtung mit LED, Düsseldorf, 2010.

SCHILLER, C.; PEPLER, W.; GESSNER, F.; KHANH, T. Q.: Latest LED-Projects in Germany: Energy Saving Potential, Lighting Quality and Evaluation of 10 State-Aided Interior- and Street Lighting LED-Projects.

In: CIE, Hrsg., Proceedings of the 27th Session of the CIE - Part I - Sun City, South Africa, 10 July - 15 July 2011 / Vol. 1, CIE Central Bureau, Vienna, S. 366–375, 2011, ISBN 978 3 901906 99 2.

SCHILLER, C.; SPRUTE, J. H.; BÖLL, M.; KHANH, T. Q.; GROH, A.: HID vs. Tungsten Halogen Headlamps: Driver Preferences and Visibility Distance – SAE Technical Paper 2009-01-0550.

In: SAE INTERNATIONAL, Hrsg., Proceedings of the SAE World Congress 2009, Warrendale, PA, 2009.

SCHILLER, C.; SPRUTE, J. H.; HAFFERKEMPER, N.; KHANH, T. Q.: Über lichttechnische und physiologische Feldtests an den weltweit ersten LED-Frontscheinwerfer-Autos.

In: LiTG, Hrsg., Tagungsband LICHT 2008 - Ilmenau, 10. bis 13. September; 18. Gemeinschaftstagung, LiTG, Berlin, 2008, ISBN 978-3-927787-34-6.

SCHILLER, C.; SPRUTE, J. H.; HAFFERKEMPER, N.; KHANH, T. Q.: Discomfort Glare - Impact of Headlamp Optics, Spectrum of Adaptation and SPD.

In: KHANH, T. Q., Hrsg., Proceedings of the 8th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Utz Verlag GmbH, München, S. 31–37, 2009, ISBN 978-3-8316-0904-8.

SPRUTE, J. H.; HAFERKEMPER, N.; SCHILLER, C.; BRÜCKNER, S.; KNOBLOCH, V.; KHANH, T. Q.: Bewertung der Blendbelastung neuartiger Kfz-Scheinwerfersysteme.

In: LiTG, Hrsg., Tagungsband LICHT 2008 - Ilmenau, 10. bis 13. September; 18. Gemeinschaftstagung, LiTG, Berlin, 2008, ISBN 978-3-927787-34-6.

SPRUTE, J. H.; HAFERKEMPER, N.; SCHILLER, C.; KHANH, T. Q.: Implications of Adaptive High Beam Headlighting Systems for Discomfort and Disability Glare – SAE Technical Paper 2009-01-0549.

In: SAE INTERNATIONAL, Hrsg., Proceedings of the SAE World Congress 2009, Warrendale, PA, 2009.

SPRUTE, J. H.; HAFERKEMPER, N.; SCHILLER, C.; ZYDEK, B. W.; KHANH, T. Q.: Dynamic Glare Assessment – Defining Undue Glare in Night-time Driving.

In: KHANH, T. Q., Hrsg., Proceedings of the 9th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Utz Verlag GmbH, München, S. 372–381, 2011, ISBN 978-3-8316-4093-5.

SPRUTE, J. H.; SÖLLNER, S.; HAFERKEMPER, N.; SCHILLER, C.; ZYDEK, B. W.; KHANH, T. Q.: Investigations on Glare Impact at Long Distances.

In: KHANH, T. Q., Hrsg., Proceedings of the 8th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Utz Verlag GmbH, München, S. 43–52, 2009, ISBN 978-3-8316-0904-8.

Projekte

Im Rahmen der vergangenen Jahre wurden folgende ausgewählte Projekte hauptverantwortlich oder unterstützend betreut (chronologische Reihenfolge):

Untersuchung der weltweit ersten LED-Frontscheinwerfer unter praxisnahen Bedingungen. Es wurden umfangreiche Testfahrten mit Probandenbefragungen sowie messtechnische Analysen im Praxisvergleich mit den etablierten Scheinwerfertechnologien auf Basis von Xenon- und Halogenlampen durchgeführt. Kooperationsprojekt mit der Adam Opel AG, der Automotive Lighting Reutlingen GmbH und Valeo Ltd. Zeitraum: 2007-2008.

Messtechnische Analyse der Lichtausbeute verschiedener Straßenleuchten auf der Basis von Entladungslampen im Vergleich und Einfluss auf das Wahrnehmungsverhalten. Es wurden die lichtmesstechnischen und elektrischen Eigenschaften ermittelt, um unter lichttechnisch vergleichbaren Bedingungen die visuelle Wahrnehmung zu untersuchen. Kooperationsprojekt mit der Süwag Energie AG in Hofheim und Bad Soden. Zeitraum: 2008-2009. Im Rahmen dieser Kooperation entstand auch ein Testfeld zur Untersuchung des Alterungsverhaltens von Straßenleuchten unter realen Bedingungen, das bis heute betrieben wird.

Aufbau der ersten Teststrecke zur Untersuchung der visuellen, lichtmesstechnischen und elektrischen Parameter von LED-Straßenleuchten und konventionellen Straßenleuchten im direkten Vergleich. Analog zu den Untersuchungen in Hofheim und Bad Soden wurden hier erstmals LED-Straßenleuchten in die Untersuchung mit einbezogen. Kooperationsprojekt mit der Stadt Darmstadt und der HSE AG in der Grillparzerstraße in Darmstadt-Arheilgen. Zeitraum: 2009-2010.

Überprüfung der Leistungsfähigkeit und Einsetzbarkeit von LED-Straßenleuchten in Hauptverkehrsstraßen unter Einhaltung der normativen Vorgaben. Kooperationsprojekt mit der Stadt Darmstadt und der HSE AG in der Landgraf-Georg-Straße in Darmstadt. Zeitraum 2010-2011.

Evaluation des Bundeswettbewerbs „Kommunen in neuem Licht“ als Teilprojekt „EvalKomm“. Förderprojekt des BMBF durch das VDI Technologiezentrum im Rahmen der Leitmarktinitiative zur lichttechnischen Begutachtung der 10 geförderten Kommunen. Zeitraum 2011-2013.

Untersuchung von Adaptiven Fernlichtsystemen, Kooperationsprojekt mit der LightSightSafety Initiative der CLEPA (LSS), Zeitraum 2011-2012.

Performance Quality Label (PQL) für LED-Leuchten. Förderprojekt des BMWi über die AiF zur Erarbeitung normativer Gütekriterien beim Einsatz von LED-Leuchten. Zeitraum 2011-2013.

Betreute Arbeiten

BÖLL, M.: Leuchtdichteuntersuchungen im mesopischen Bereich, Studienarbeit.
Technische Universität Darmstadt, Lichttechnik, Darmstadt, 2007.
Betreuer: Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christoph Schiller

GAUS, V.: Inbetriebnahme und Kalibrierung eines Bisppektralmessplatzes sowie Auswertung der Messdaten nach aktuellen physiologischen Gesichtspunkten, Diplomarbeit.
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Darmstadt, 2010.
Betreuer: Dipl.-Ing. Nils Haferkemper; Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christoph Schiller

GUTMANN, F. T.: Entwurf, Aufbau und Validierung eines Versuchsstands zur Untersuchung des spektralen Blend- und Detektionsverhaltens unter Straßenverkehrsbedingungen, Diplomarbeit.
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Darmstadt, 2012.
Betreuer: Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christoph Schiller; Dipl.-Ing. Bastian Zydek

KOBBERT, J.: Kalibrierung, Optimierung und Charakterisierung eines Eye-Tracking-Systems für den KFZ-Einsatz, Masterarbeit.
Technische Universität Darmstadt, Lichttechnik, Darmstadt, 2014.
Betreuer: Dipl.-Ing. Dmitrij Polin; Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christoph Schiller

KOSMAS, K.: Messtechnische Charakterisierung von Scheinwerfern mit adaptivem Fernlicht unter dynamischen Bedingungen, Masterarbeit.
Technische Universität Darmstadt, Lichttechnik, Darmstadt, 2015.
Betreuer: Dipl.-Ing. Dmitrij Polin; Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christoph Schiller

SCHNEIDER, P.: Untersuchung der lichttechnischen Kenngrößen von Kfz-Heckleuchten als Funktion von Fahrabständen und Umfeldhelligkeiten, Masterarbeit.
Technische Universität Darmstadt, Lichttechnik, Darmstadt, 2014.
Betreuer: Dipl.-Ing. Dmitrij Polin; Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christoph Schiller

SCHULZ, M.: Erarbeitung eines Konzeptes zur empirischen Untersuchung der subjektiven Wahrnehmung von Straßenbeleuchtung, Bachelorarbeit.

Technische Universität Darmstadt, Lichttechnik, Darmstadt, 2009.

Betreuer: Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christoph Schiller

STOJANOVIC, D.: Entwicklung und Aufbau einer Versuchseinrichtung zur Erzeugung einer von der Lampengeometrie unabhängigen Lichtverteilung, Bachelorarbeit.

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Darmstadt, 2013.

Betreuer: Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christoph Schiller; Dipl.-Phys. Max Wagner

Erklärung laut §9 der Promotionsordnung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation allein und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur verfasst habe.

Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Münster, den 27. Februar 2015

Christoph Wolfgang Schiller